

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2010**

**Bc. Jan Unger**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vliv větrných elektráren na vybrané parametry  
elektrické energie**

**Influence of Wind Power Plant on Choice  
Parameters of Electrical Power**

**2010**

**Bc. Jan Unger**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 4. května 2010

.....

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování této práce.

## **Abstrakt**

Větrná energie byla již v historii lidstva jeho velkým pomocníkem. Zatímco dříve se síla větru měnila na mechanickou práci, dnes se díky rychlému vývoji techniky vyrábí energie elektrická. Srdcem každé větrné elektrárny, vyrábějící elektrickou energii je synchronní nebo asynchronní generátor. Tato energie o určitých parametrech je dále transformována na patřičnou hladinu napětí a nebo bez transformace rovnou dodávána do distribuční soustavy. Provozovatel větrných elektráren se zaručuje za kvalitu elektrické energie, kterou dodává. V opačném případě musí být větrné mlýny odpojeny od elektrizační soustavy. Společnost ENIGEN, s.r.o., se kterou jsem spolupracoval, se zabývá komplexním provozem energetických hospodářství a sem patří i zjišťování kvality elektrické energie. Na základě měření, která mi byla poskytnuta z větrných elektráren ve Veselí a Dobešově v Oderských vrších, jsem zjišťoval vliv větrných elektráren na vybrané parametry elektrické energie. Tato analýza je provedena a popsána v poslední části mé diplomové práce.

## **Klíčová slova**

Větrná elektrárna, provozovatel distribuční soustavy, asynchronní generátor, větrná energie, kvalita elektrické energie, větrný motor, větrný potenciál, analyzátor kvality elektřiny

## **Abstract**

Wind energy has been in the history of humanity's great helper. Once the force of the wind changed into mechanical work today due to the rapid evolution of technology produces electrical energy. The heart of each wind turbine, electricity generator is a synchronous or asynchronous generator. This power of certain parameters is further transformed into the appropriate voltage levels and with or without transformation directly delivered to the grid. The operator of wind turbines to ensure the quality of electricity supplied by. Otherwise, they must be disconnected from the windmill power system. ENIGEN Company Ltd., with whom I worked, is engaged in the operation of complex energy economy and this includes detection of power quality. Based on the measurements, which were given to me from the wind turbines in joy and in Dobešová Oderske hills, I examined the impact of wind power plants on selected parameters of electrical energy. This analysis is conducted and reported in the last part of my thesis.

## **Key words**

Wind power plant, distribution system operator, asynchronous generator, wind power, power quality, wind motor, wind potential, power quality analyzer

# Seznam použitých symbolů a zkratek

$A, A_1, A_2$	Průřez	[m]
$A_K$	Plocha kormidla	[m <sup>2</sup> ]
$a$	Vzdálenost od osy natáčení k rovině vrtule	[m]
$C_P$	Výkonový součinitel	[-]
$c$	Vzdálenost od osy natáčení k těžišti kormidla	[m]
ČEZ	České energetické závody	[-]
ČR	Česká republika	[-]
$D$	Průměr vrtule	[m]
DS	Distribuční soustava	[-]
$\Delta$	Odchylka od směru větru	[°]
$\Delta E_k$	Změna kinetické energie	[J]
$\Delta P$	Poměrná ztráta výkonu	[%]
$\Delta u_{ers}$	Náhradní změna napětí	[%]
$\Delta u_{max}$	Největší změna napětí	[%]
EU	Evropská unie	[-]
ERÚ	Energetický regulační úřad	[-]
$F_a$	Axiální síla	[N]
$G$	Tachodynamo	[-]
$\lambda_0$	Rychloběžnosti	[-]
HDO	Hromadné dálkové ovládání	[-]
$h$	Řád harmonické	[-]
CHKO	Chráněná krajinná oblast	[-]
$I_a$	Zapínací ráz	[A]
$I_{nG}$	Jmenovitý proud generátoru	[A]
JV	Jihovýchod	[-]
$k_k$	Empirický součinitel	[-]
$k_{i\psi}$	Činitel spínání závislý na síti	[-]
$k_{imax}$	Největší spínací ráz	[-]
MN	Motor	[-]
NN, nn	Nízké napětí	[-]
$\eta_i$	Ideální účinnost	[-]
$P$	Výkon	[W]
$P_{lt}, P_{lt}$	Dlouhodobá míra vjemu flikru	[-]
$P_{st}, P_{st}$	Krátkodobá míra vjemu flikru	[-]
PDS	Provozovatel distribuční soustavy	[-]
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy	[-]
PS	Přenosová soustava	[-]
$\rho$	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S_{kV}$	Zkratový výkon v síti PDS	[VA]
$S_{nE}$	Zdánlivý výkon výroby	[VA]
SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO	Oxid siřičitý, oxid uhličitý, oxid dusnatý	[-]

SW	Software	[-]
SZ	Severozápad	[-]
THD	Celkový činitel zkreslení	[%]
t	Čas	[s]
$U_1, U_2$	Napětí	[V]
$U_C$	Dohodnuté napájecí napětí	[V]
$U_n$	Jmenovité napětí	[V]
$U_{rms}$	Střední efektivní hodnota napětí	[V]
VE	Větrné elektrárny	[-]
VN, vn	Vysoké napětí	[-]
VVN, vvn	Velmi vysoké napětí	[-]
v, $v_1, v_2$	Rychlost	[m/s]
Z	Zesilovač	[-]

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Úvod do problematiky větrných elektráren.....</b>	<b>2</b>
2.1	Historie a současnost v zahraničí i České republice .....	2
2.1.1	Historie.....	2
2.1.2	Současnost .....	2
2.1.3	Podmínky v České republice .....	3
2.2	Větrná energie.....	3
2.3	Přírodní podmínky .....	3
2.4	Možnosti využití .....	5
2.5	Výběr vhodných lokalit a zásady pro dimenzování.....	5
2.6	Teoretické základy.....	7
2.7	Technické řešení .....	9
2.8	Větrné motory s vodorovnou osou.....	10
2.8.1	Rozdělení větrných motorů s vodorovnou osou .....	10
2.8.2	Orientace větrných motorů .....	11
2.8.3	Regulace větrných motorů .....	14
2.9	Větrné motory se svislou osou.....	14
2.10	Větrné elektrárny .....	15
2.11	Trend větrných elektráren.....	17
<b>3</b>	<b>Monitorování a vyhodnocování parametrů kvality elektrické energie.....</b>	<b>18</b>
3.1	Kvalita elektřiny .....	18
3.1.1	Charakteristiky elektřiny dodávané z DS.....	18
3.1.2	Charakteristiky elektřiny dodávané regionálními výrobci.....	18
3.2	Způsoby hodnocení parametrů kvality.....	21
3.2.1	Systémy měření, archivace a hodnocení parametrů kvality elektřiny v DS.....	21
3.2.2	Konfigurační a komunikační pracoviště .....	22
3.2.3	Archivace a hodnocení měření.....	22
3.2.4	Vyhodnocení naměřených hodnot .....	23
3.2.5	Uživatelé .....	23
3.3	Požadavky na přístroje pro měření parametrů kvality .....	24
3.4	Specifikace metod měření a zkoušek přesnosti .....	24
3.4.1	Měřicí intervaly.....	24
3.4.2	Zkoušky přesnosti .....	25
3.5	Technické parametry.....	25
3.5.1	Pracovní rozsahy a prostředí.....	25
3.6	Měření parametrů kvality a smluvní vztahy .....	26
3.7	Analyzátory BK-ELCOM.....	27
3.7.1	Analyzátory kvality elektřiny pro trvalou instalaci.....	28
3.7.2	Přenosné analyzátory kvality elektřiny .....	28

<b>4</b>	<b>Popis sítě v místě připojení větrné elektrárny.....</b>	<b>30</b>
4.1	Území s dostatečným větrným potenciálem .....	30
4.2	Autonomní systémy .....	31
4.3	Systémy připojené k síti.....	32
4.4	Popis technického a technologického řešení elektrárny .....	34
4.5	Princip a hlavní části větrné turbíny VESTAS V90-2,0MW .....	34
4.6	Připojení k síti.....	36
4.6.1	Změny napětí při spínání .....	36
<b>5</b>	<b>Analýza měřených dat.....</b>	<b>39</b>
5.1	Měřicí místa .....	39
5.2	Výběr dat .....	39
5.3	Zpracování dat .....	40
5.4	Napětí.....	41
5.5	Napětí a výkon .....	41
5.6	Dlouhodobý vjem flikru.....	42
5.7	Krátkodobý vjem flikru .....	42
5.8	TDHu .....	42
5.9	3. a 5. harmonická.....	42
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>43</b>



# 1 Úvod

Energie větru patří k historicky nejstarším využívaným zdrojům energie. V České republice jsou možnosti využití této energie, vzhledem k přírodním podmínkám (vnitrozemské klima s nepravidelným prouděním vzduchu), dosti omezené. Proto větrné elektrárny nemohou nahradit hlavní zdroje k výrobě elektrické energie. Přesto se můžou stát významným doplňujícím zdrojem.

V první kapitole méj diplomové práce jsem definoval základní pojmy a problémy související s větrnou energií, větrnými elektrárnami a jejich fungováním. Začal jsem o prvopočátcích využívání větru a větrných mlýnů. Poté jsem uvedl současný stav problematiky ve světě, ale hlavně v České republice, co se týče možností využití a přírodních podmínek pro výstavbu větrných farem. Rozdělil jsem větrné motory podle orientace osy otáčení na motory se svislou a vodorovnou osou a tyto detailněji popsal. Ke konci jsem popsal samotné větrné elektrárny z hlediska výkonů, typu generátorů, technického řešení s uvedením výhod a nevýhod a také jsem srovnal Českou republiku s ostatními zeměmi ohledně množství vyráběné elektrické energie z větru.

Druhá kapitola pojednává o kvalitě elektrické energie a jejím monitorování a vyhodnocování. Nejprve jsem obecně objasnil samotný pojem „kvalita elektrické energie“ a poté jsem rozepsal většinu vysokonapěťových napájecích charakteristik. Dále jsem detailně popsal systémy pro měření, archivaci a hodnocení parametrů elektrické energie, včetně analyzátorů, kterým jsem věnoval podstatnou část této kapitoly. Začal jsem u jejich všestranností, dále jsem sepsal technické parametry, intervaly měření a zkoušky přesnosti. Na závěr kapitoly jsem rozdělil analyzátory BK-Elcom na dvě skupiny podle způsobu instalace a ke každé jsem uvedl několik typů přístrojů

Třetí kapitola začíná popisem výhod, nevýhod a technickým řešením nezávislých autonomních systémů a systémů připojených k síti. Dále jsem uvedl technické parametry konkrétní větrné elektrárny VESTAS V90-2,0 MW a technologii jejího usazení. Popsal jsem hlavní části a principy větrné elektrárny od systému Optispeed, přes hlavní hřídel, generátor, až po zvyšovací transformátor, brzdící systém a kryt strojovny. Vynesl jsem graf výkonové křivky V90-2,0 MW, která znázorňuje závislost výkonu na rychlosti větru. Před popsáním samotného připojení větrné elektrárny a kabelové trasy jsem se ještě zmínil o lokalitě Oderských vrchů, jejího optimálního využití pro výstavbu dalších turbín a v neposlední řadě o podmínkách připojování větrných elektráren k distribuční síti.

Poslední kapitola s názvem Analýza měřených dat popisuje nejprve počáteční práci se softwarem pro čtení souborů s naměřenými daty. Jedná se o program ENA verze 2.8. Věnoval jsem pár řádků tomuto programu a manipulaci s ním. Dále jsem popsal exportování a zpracovávání měřených dat včetně písemného vyhodnocení výsledků a zhotovení grafů umístěných v přílohách mé diplomové práce.

## 2 Úvod do problematiky větrných elektráren

### 2.1 Historie a současnost v zahraničí i České republice

#### 2.1.1 Historie

K rozvoji ve využívání větrných motorů došlo při osidlování západních oblastí USA. V polovině 19. století zde bylo postaveno více než 6 milionů malých větrných motorů, určených převážně k čerpání vody pro potřebu farmářů a napájení dobytka, k různým pohonům a později i k výrobě elektřiny.

Úpadek větrných motorů souvisí s rozšířením parního stroje v předminulém století. Malé větrné motory ztratily svůj význam s rozšiřující se elektrifikací a s rozvojem malých spalovacích motorů, které byly při nízkých cenách kapalných paliv značně výhodnější.

Přesto se i ve 20. století vyvíjely různé motory, např. větrný motor postavený v SSSR u Jalty na Krymu v roce 1931 o výkonu 100 kW nebo anglický větrný motor instalovaný společností Enfield Cable Company podle zajímavého návrhu francouze Andreaua, kde duté, na konci otevřené lopatky rotoru pracovaly jako radiální kompresor odsávající vzduch z dutého stožáru, v němž byla umístěna rychloběžná vzduchová turbína s generátorem. Účinnost však byla nižší než u klasických rotorů s vodorovnou osou. Největší větrný motor Smith-Putnam, provozovaný v letech 1941 až 1945, byl instalován v USA ve státě Vermont. Motor dosahoval výkonu 1250 W, průměr rotoru byl 53,5 m, jeho provoz skončil havárií, utržením jedné z rotorových lopatek.

Vývoj větrných motorů rovněž pokračoval v Dánsku, Francii a v Německu, kde stojí za zmínku velmi dokonale propracovaný větrný motor o výkonu 100 kW Hülter-Algaier, který lehkými rotorovými listy ze skelného laminátu a i s jinak velmi odlehčenou konstrukcí patřil k nejúspěšnějším a vysoce spolehlivým jednotkám ve světě. Byl provozován v letech 1957 až 1968.

V šedesátých letech docházelo k výraznému útlumu všech projektů větrných motorů, protože jimi vyrobená elektrická energie byla při tehdejších cenách kapalných a jiných paliv výrazně dražší než z tepelných elektráren. Prudký vzestup cen paliv v sedmdesátých letech a zvýšená péče o životní prostředí změnily názor na využívání větrných motorů v současnosti.

#### 2.1.2 Současnost

Problematika využívání obnovitelných zdrojů energie a tedy i energie větru je v současné době velmi aktuální a v mnoha zemích se opět rozvíjí výroba větrných motorů s hlavním zaměřením na výrobu elektrické energie a čerpání vody. Hlavní zájem o výrobu větrných motorů je v zemích s rozvinutým průmyslem a s příznivými větrnými podmínkami. V Evropě jsou to zejména země ležící při pobřeží Severního moře a severnějšího pobřeží Atlantického oceánu (Dánsko, Nizozemí, Německo, Velká Británie a Francie).

Na americkém kontinentu jsou nejvýznamnějšími zájemci Kanada a USA, kde jsou výhodné větrné podmínky do velké hloubky podél severního pobřeží Atlantického oceánu, Tichého oceánu a Severního ledového oceánu. Nejznámějším místem hromadného využití větrných motorů je Altamonský průsmyk v Kalifornii, kde bylo v 70. letech instalováno asi 6000 větrných motorů

s elektrickými generátory o průměrném výkonu kolem 100 kW. Je zajímavé, že velké množství větrných motorů provozovaných v USA bylo vyrobeno v Dánsku.

Přestože větrné podmínky v ostatních částech evropského a asijského kontinentu nejsou tak příznivé, je veliký zájem o využívání větrné energie a výrobu potřebné technologie v Rusku, v pobaltských republikách a ve Švédsku. Rovněž v Číně se vyvíjejí a vyrábí větrné motory, velké množství větrných čerpadel je instalováno v ústí Žluté řeky, kde čerpají vodu k odsolování půdy. Významné místo ve výrobě větrných čerpadel zaujímá také Austrálie, Nový Zéland, Thajsko, Filipíny a Indie.

### **2.1.3 Podmínky v České republice**

V České republice jsou příznivé větrné podmínky převážně pouze v horských oblastech, existuje však výrobní potenciál, který by bylo možné využívat pro tuzemskou potřebu i pro export, pokud by byla dosažena potřebná dobrá kvalita výrobků. Podle provedeného posouzení větrné situace by u nás bylo možné vyrobit ročně větrnými elektrárnami 1 až 3 miliony MWh, tedy jen několik málo procent vyráběné elektrické energie. Odhad bude moci být upřesněn po podrobnějším průzkumu a proměření lokalit vhodných pro stavbu větrných elektráren. Druhým faktorem určujícím velikost potenciálu větru využitelného pro výrobu elektrické energie je cena, za kterou ji lze prodávat, aby vynaložená investice na výstavbu větrné elektrárny měla požadovanou návratnost. Čím je vyšší cena energie a nižší investiční náklady, tím lze využívat efektivně i oblasti s horšími větrnými podmínkami a celkový využitelný potenciál větru se zvyšuje. Zatím u nás existuje několik firem zabývajících se výrobou větrných elektráren o výkonu do několika desítek kW a bylo vyrobeno a instalováno též několik prototypů o výkonu několik set kW, dosud se však jedná jen o krátkodobější nebo zkušební provoz, několik dalších větrných elektráren od našich nebo zahraničních výrobců je v různých fázích výstavby. Nejdéle (od r. 1990) u nás pracuje 150 kW dánská větrná elektrárna v Hrubé Vrbce, která produkuje ročně přibližně 200 MWh. [1]

## **2.2 Větrná energie**

Větrná energie je jen jedna z forem sluneční energie. Vzniká díky tomu, že Slunce zahřívá Zemi nerovnoměrně. Mezi různě zahřátými oblastmi vzduchu v zemské atmosféře vznikají tlakové rozdíly, které se vyrovnávají prouděním vzduchu. Pod pojmem vítr rozumíme pouze horizontální složku proudění vzduchu, ve vrstvě několika desítek metrů nad zemí jsou stoupavé vzdušné proudy nevýznamné.

Výhodou větrné energie je, že ji, na rozdíl třeba od energie biomasy, dokážeme poměrně snadno přeměnit na žádanou elektřinu. Využívání větru tak může napomoci splnění národního cíle - produkovat v roce 2010 z obnovitelných zdrojů 8 % celkové spotřeby elektřiny. Potenciál větrné energie v ČR se odhaduje na 4 000 GWh ročně. To jsou asi 4 % naší celkové spotřeby elektřiny. V bilanci celkové energetické spotřeby jde asi o jedno procento.

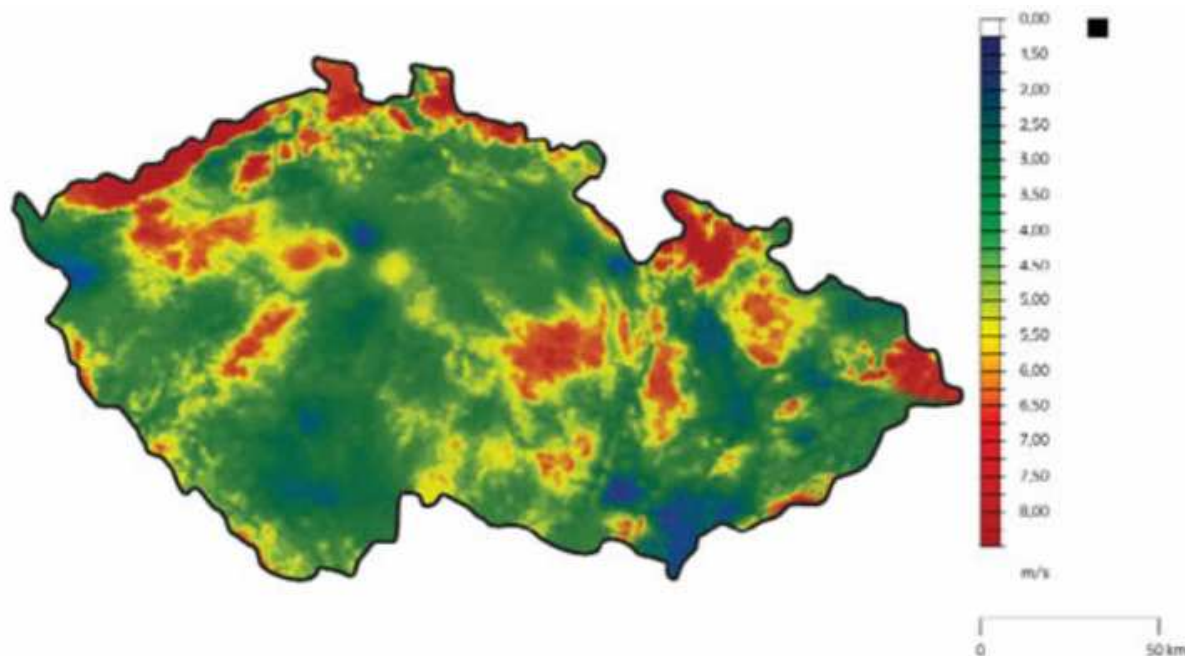
## **2.3 Přírodní podmínky**

Česká republika je vnitrozemský stát s typicky kontinentálním klimatem, které se projevuje významným sezónním kolísáním rychlostí větru. Příčinou je zejména globální vzdušné proudění typické pro severní a střední Evropu.

Rychlost větru je nejdůležitějším údajem při využívání energie větru, udává se převážně v m/s. Poblíž zemského povrchu je proudění vzduchu ovlivňováno členitostí terénu - vítr je zpomalován terénními překážkami - stavbami, kopci a také druhem povrchu (tráva, les, vodní hladina, sníh apod.). S rostoucí výškou se rychlost větru logaritmicky zvyšuje. Je tedy velký rozdíl mezi rychlostí větru ve výšce 10 m a 100 m nad terénem.

Proudění vzduchu je vždy turbulentní, což se projevuje kolísáním rychlosti a směru větru. Výsledky měření směru a rychlosti větru jsou proto průměrované za určitý časový interval, tzv. vzorkovací dobu. Měření rychlosti větru se provádí anemometry (mechanické či elektronické).

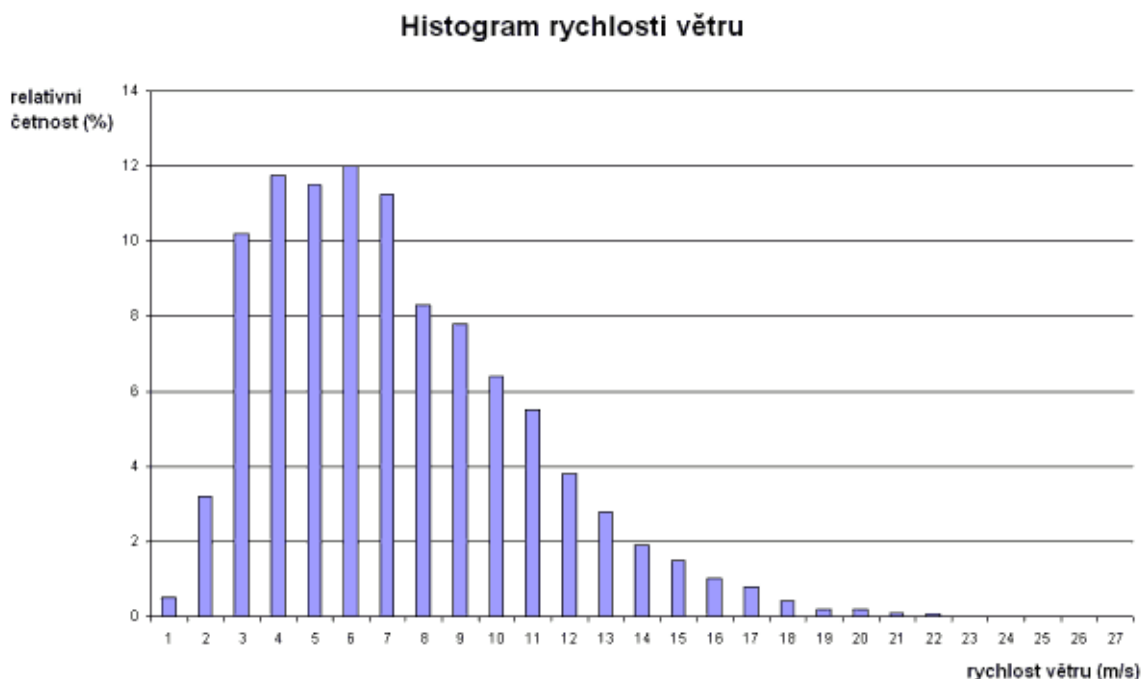
Pro velmi hrubou představu o rychlosti větru lze použít běžně dostupná měření meteorologických stanic. Měření rychlosti a směru větru se spolu s jinými klimatickými údaji provádí v ČR síti cca 200 meteorologických stanicích ČHMÚ, včetně stanic synoptických a klimatologických. Výsledky měření jsou odborně kontrolovány, archivovány a jsou k dispozici za úhradu buď ve formě nezpracovaných dat, nebo ve formě výsledků analýzy těchto dat prováděných pro různé účely.



**Obr. 1** Větrný atlas České republiky

Jsou-li nepřímě získané údaje o rychlosti větru příznivé, je nutné provést měření rychlosti větru přímo v dané lokalitě. Měření by mělo trvat alespoň rok, měřicí přístroj by měl být v ideálním případě umístěn ve výšce osy budoucího rotoru elektrárny (vrtule). [2]

Dalším problémem je relativní četnost rychlosti větru jak je ukázáno na obr. 2. V podmínkách České republiky se vyrobí nejvíce elektrické energie z větrů vanoucích rychlostmi okolo  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tato relativní četnost větru má také za následek proměnnou dodávku elektrického výkonu větrných elektráren, což má negativní vliv na elektrickou síť z hlediska spolehlivosti dodávek elektrické energie.



**Obr. 2** Histogram rychlosti větru [8]

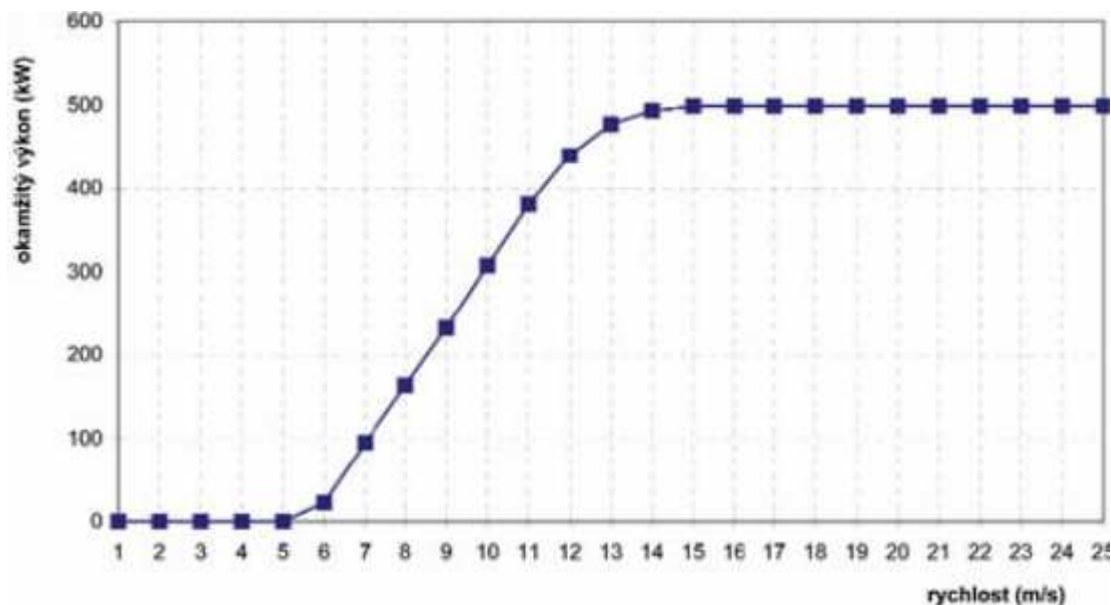
## **2.4 Možnosti využití**

Dnes se z větru získává zejména elektřina. Velká zařízení dodávají elektřinu do sítě. Drobná zařízení mohou sloužit i pro zásobování odlehlých objektů nepřipojených k síti - horských chat, lodí apod. Historicky se energie větru převáděla přímo na mechanickou práci. Dnes jsou funkční větrné mlýny spíše jen kuriozitou. Občas se můžeme setkat s větrnými čerpadly na vodu, např. na pastvinách.

Větrné elektrárny jsou i lákavým turistickým cílem, např. poblíž Vídně můžeme navštívit elektrárnu, která má pod vrtulí i vyhlídkovou plošinu. Setkat se můžeme i s využitím větrné elektrárny jako reklamního poutače.

## **2.5 Výběr vhodných lokalit a zásady pro dimenzování**

V případě vnitrozemských oblastí, tedy i v ČR, jsou příhodné lokality převážně ve vyšších nadmořských výškách, obvykle nad 500 m n. m. V nižších nadmořských výškách je roční průměrná rychlost větru nízká (kolem 2 až 4 m/s). Rychlost větru je naprosto zásadní parametr, neboť energie větru roste se třetí mocninou jeho rychlosti. Při zdvojnásobení rychlosti větru (např. ze 4 m/s na 8 m/s) vzroste jeho energie osmkrát. I malá odchylka v rychlosti větru se tedy výrazně projeví na množství získané elektřiny.



**Obr. 3** Výkonová charakteristika větrné elektrárny s výkonem 500 kW

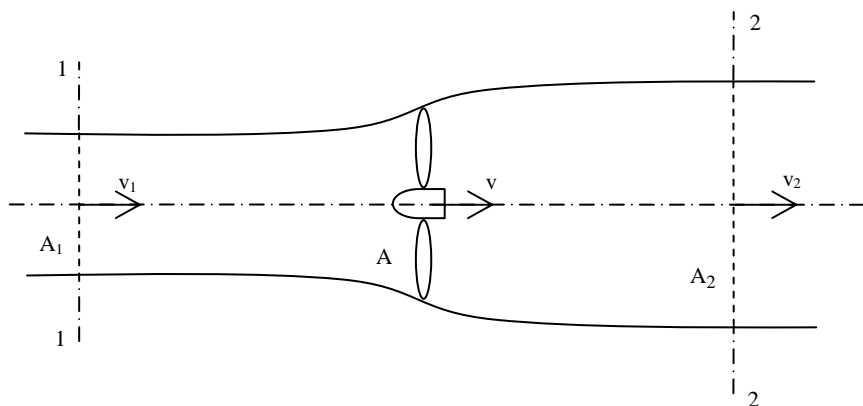
K ohodnocení konkrétní lokality je nejvhodnější stanovení distribuční charakteristiky, což je rozdělení četnosti rychlostí větru zjištěné kontinuálním měřením rychlosti ve výšce osy rotoru. Ideální je alespoň roční měření porovnané s dlouhodobými údaji na blízkých meteorologických stanicích. Jednotlivé roky se od sebe mohou značně lišit. Před rozhodnutím o stavbě elektrárny je tedy třeba znát následující vstupní údaje:

- měřené průměrné rychlosti větru včetně četnosti směru, ideálně roční měření,
- množství a parametry překážek, které způsobují turbulenci a brání laminárnímu proudění větru (porosty, stromy, stavby, budovy),
- chod ročních venkovních teplot či jiných nepříznivých meteorologických jevů (např. námrazy způsobují odstávky),
- nadmořská výška (hustota vzduchu),
- možnost umístění vhodné technologie:
  - únosnost podloží, kvalita podkladu a seismická situace, geologické podmínky pro základy elektrárny,
  - dostupnost lokality pro těžké mechanismy, možnosti pro vybudování potřebné zpevněné komunikace,
  - vzdálenost od přípojky VN nebo VVN s dostatečnou kapacitou,
  - vzdálenost od obydlí, která by měla být dostatečná kvůli minimalizaci možného rušení obyvatel hlukem (nejvyšší přípustná hladina hluku ve venkovním prostoru na obytném území je ve dne 50 dB a v noci 40 dB),
  - míra zásahu do okolní přírody - zátěž při výstavbě elektrárny a budování přípojky, zásah do vzhledu krajiny (umístění v CHKO nebo v oblasti NATURA 2000 velmi komplikuje povolenací řízení),
  - majetkoprávní vztahy k pozemku, postoj místních úřadů a občanů. [2]

## 2.6 Teoretické základy

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Základní princip jejich funkce spočívá v tom, že zpomalují proud vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou a tím odnímá část jeho energie. To znamená, že nelze odebrat z jednotkové plochy více energie, než vítr obsahuje. I když formulace zákona o zachování energie je zcela jasná a jednoznačná, dokáží někteří amatérští vynálezci a konstruktéři ve svých úvahách dospět ke značně vyšším hodnotám.

Na Obr. 4 je znázorněn proud vzduchu protékající idealizovaným větrným motorem. Neuvažuje se v něm míšení proudu, ve vodorovném směru je proud omezen dvěma kontrolními plochami 1 a 2, v nichž má rychlost  $v_1$  a  $v_2$  a protéká průřezy  $A_1$  a  $A_2$ . V rovině vrtule s průtočnou plochou  $A$  je rychlost proudu  $v$ .



**Obr. 4** Idealizovaný větrný motor

V prostoru omezeném proudovými plochami se nepřenáší hmota ani energie a platí tedy rovnice kontinuity

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad \text{Rov. 1}$$

a ze zákona o zachování hybnosti lze odvodit axiální sílu působící na rotor

$$F_a = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad \text{Rov. 2}$$

a výkon

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad \text{Rov. 3}$$

Výkon vypočítaný ze změny kinetické energie proudu proteklého za sekundu

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Rov. 4}$$

Ze srovnání rovnic Rov. 3 a Rov. 4 vyplývá

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad \text{Rov. 5}$$

Axiální síla působící na rotor

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Rov. 6}$$

a výkon rotoru

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2). \quad \text{Rov. 7}$$

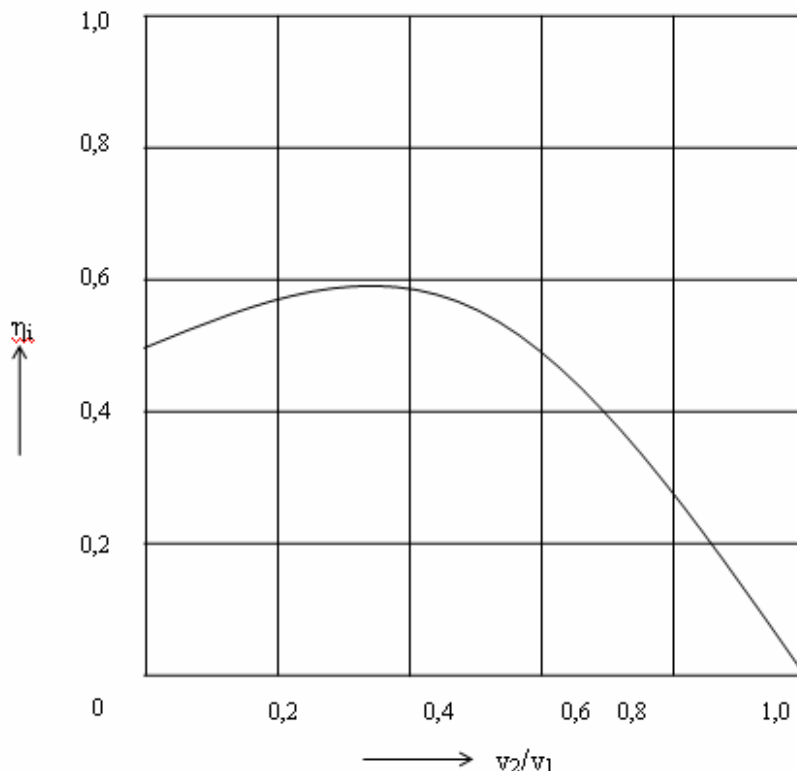
Vyjádří-li se tento výkon v poměru k výkonu větru, vznikne bezrozměrná veličina, ideální účinnost  $\eta_i$ , které lze dosáhnout v ideálním rotoru s nekonečným počtem lopatek pracujících bez aerodynamického odporu

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{2v_1^2} \quad \text{Rov. 8}$$

Závislost účinnosti pro různé poměry rychlosti  $v_2/v_1$  je na Obr. 5. Derivováním této funkce podle proměnné  $v_2$  lze početně stanovit maximálně dosažitelnou ideální účinnost označovanou též jako Betlovu, která při  $v_2/v_1 = 1/3$

$$\eta_i = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad \text{Rov. 9}$$





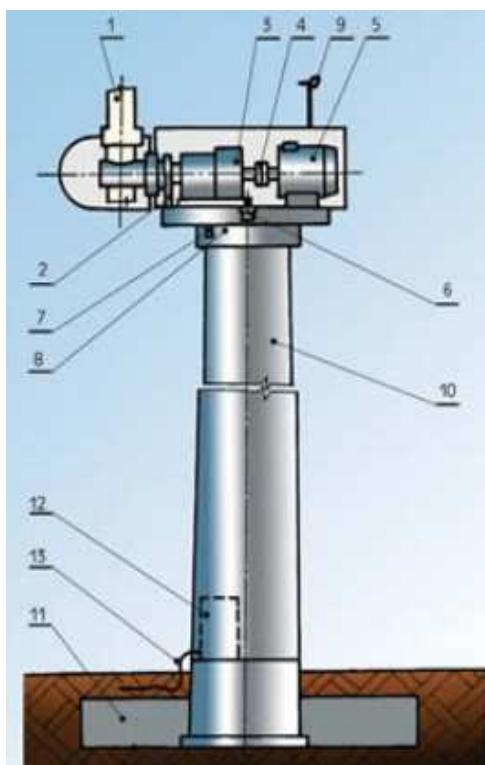
Obr. 5 Závislost účinnosti pro různé poměry rychlosti  $v_2/v_1$

Pro dosažení této účinnosti by ovšem musel mít idealizovaný rotor s nekonečným počtem nekonečně tenkých lopatek, na nichž by nevznikalo tření, nekonečně velkou obvodovou rychlost, aby v odtékajícím proudu vzduchu o rychlosti  $v_2$  nevznikala rotační složka, která by zvyšovala jeho kinetickou energii. Ideální mezní účinnost leží značně výš, než reálně dosažitelné hodnoty. [1]

## 2.7 Technické řešení

Podle aerodynamického principu dělíme větrné motory na vztahové a odporové. Nejrozšířenějším typem jsou elektrárny s **vodorovnou osou otáčení**, pracující na vztahovém principu, kde vítr obtéká lopatky s profilem podobným letecké vrtuli. Na podobném principu pracovaly již historické větrné mlýny, nebo tak pracují větrná kola vodních čerpadel (tzv. americký větrný motor). Po experimentech s jedno-, dvou- i čtyřlístými rotory již všechny velké moderní elektrárny používají rotory třílísté, které mají nejlepší parametry.

Existují také elektrárny se **svislou osou otáčení**, které pracují na odporovém principu (typ Savonius) nebo na vztahovém principu (typ Darrieus). Výhodou vztahových elektráren se svislou osou je, že mohou dosahovat vyšší rychlosti otáčení, a tím i vyšší účinnosti. Pracují tedy i při nižší rychlosti větru a není třeba je natáčet podle směru větru. Elektrárny se svislou osou otáčení se donedávna v praxi příliš nepoužívaly. Důvodem bylo jejich mnohem vyšší dynamické namáhání, a tedy i nižší životnost. Tento problém se však podařilo do určité míry konstrukčně vyřešit. Pro výše uvedené výhody a také menší hlučnost se začínají v Británii a USA využívat přímo v městské zástavbě. Stále jde však o menší zařízení s nižšími výkony.



Obr. 5 Schéma větrné elektrárny [2]

Základní části zařízení:

- 1 - rotor s rotorovou hlavicí
- 2 - brzda rotoru
- 3 - planetová převodovka
- 4 – spojka
- 5 – generátor
- 6 - servo-pohon natáčení strojovny
- 7 - brzda točny strojovny
- 8 - ložisko točny strojovny
- 9 - čidla rychlosti a směru větru
- 10 - několikadílná věž elektrárny
- 11 - betonový armovaný základ elektrárny
- 12 - elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu
- 13 - elektrická přípojka.

## 2.8 Větrné motory s vodorovnou osou

### 2.8.1 Rozdělení větrných motorů s vodorovnou osou

Větrné motory s vodorovnou osou pracující na vztakovém principu jsou nejrozšířenějším typem motorů používaných pro přeměnu větrné energie. Vyrábějí se do výkonů až několika MW a některé jejich typy jsou velmi rozšířené. Lze je rozdělit do tří skupin:

- klasické větrné mlýny
- pomaloběžné větrné motory
- rychloběžné větrné motory

Zkušenosti se stavbou větrných mlýnů a čerpadel sbírané po staletí vedly k postupnému zdokonalování konstrukčního provedení a aerodynamického řešení rotoru, takže větrné motory dosáhly relativně vysokých hodnot využití větrné energie a jejich výkonový součinitel  $C_p = 0,3$ . Také moment síly měl příznivý průběh, takže jejich rozběh při menších rychlostech větru nečinil žádné potíže. Některé z nich dosahovaly výkon přes 40 kW s rotory až 30 m v průměru.

Pomaloběžné větrné motory se objevily kolem r. 1970 v USA, kde sehrály významnou úlohu zejména při osidlování západní části Spojených států. Používaly se k pohonu vodních čerpadel, pro potřebu farem i pro napájení dobytka. Vyráběly se a dosud vyrábějí až do průměru rotoru kolem 9 m, byl však vyroben také rotor s průměrem 15 m. S ohledem na jejich regulaci a konstrukční provedení nelze průměr zvětšovat.

Rychloběžné větrné motory mají rotor provedený nejčastěji jako dvou nebo třilistou vrtuli, s pevnými nebo natáčecími listy. U jednotek větších výkonů jsou dosahovány optimální hodnoty výkonového součinitele  $C_p$  kolem 0,45 při rychloběžnosti  $\lambda_0 = 6$  i více a rychloběžných větrných elektráren v některých režimech práce tak vycházejí celkové účinnosti přes 40 % z výkonu větru protékajícího rotorem

Současné rychloběžné větrné motory se používají převážně na výrobu elektrické energie, mohou však pohánět přímo také kompresory, odstředivá čerpadla a jiné pracovní stroje. Vrtulové listy mají u všech větších větrných motorů velmi kvalitní aerodynamický profil, který se mění po celé délce listu tak, aby byla dosažena vysoká účinnost v co největším rozsahu pracovních výkonů a současně, aby byly respektovány požadavky pevnosti a provozní spolehlivosti.

Stojící rotor rychloběžného větrného motoru klade větru výrazně menší odpor než rotor pomaloběžného větrného motoru. Je-li tedy nutné z bezpečnostních důvodů při vysokých rychlostech větru motor zastavit, zmenší se namáhání rotoru a stožáru i v případě, kdy vrtulové listy zůstanou obráceny proti větru svojí plochou.

Řešení rotoru s natáčecími listy, které je možné vzhledem k jejich malému počtu, umožňuje také regulovat otáčky rotoru podle potřeby v širokém rozmezí rychlosti větru. Podle použitého způsobu regulace lze dosáhnout v některých případech plné provozní spolehlivosti i při rychlostech větru přesahujících 50 až 70 m.s<sup>-1</sup>, aniž by bylo třeba rotor zastavovat. Otáčky rotoru totiž nemusí nijak výrazně stoupnout a tím zůstanou setrvačné síly, které jsou pro namáhání rotoru rozhodující, na přijatelné úrovni.

Nevýhodou rychloběžných rotorů je jejich špatný rozběh při malých rychlostech větru. Pokud nejsou opatřeny zařízením pro jeho usnadnění, rozbíhají se teprve při rychlostech větru kolem 5 m.s<sup>-1</sup>. Jsou-li již v chodu, postačí i menší rychlost větru, při rychlosti větru kolem 4 m.s<sup>-1</sup> lze počítat s využíváním energie větru u těchto motorů jen zcela výjimečně a množství vyrobené energie je velmi malé.

Uvedené základní informace dávají možnost rozhodnout, jaký typ větrného motoru se hodí v daných větrných podmínkách a pro daný účel. V zásadě platí, že při středních rychlostech větru pod 4 m.s<sup>-1</sup> nelze počítat s efektivním využíváním rychloběžných větrných motorů, pro tyto podmínky jsou prakticky použitelné jen pomaloběžné a středně rychloběžné větrné motory co nejjednoduššího provedení, ve spojení s pomaloběžnými pracovními stroji. Pro výrobu elektrické energie jsou výhodnější rychloběžné větrné motory.

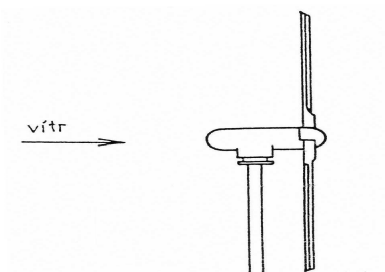
## 2.8.2 Orientace větrných motorů

Z odvozování aerodynamických poměrů na vrtulovém listu rotoru vyplývá, že podmínkou pro dosažení maximální účinnosti přeměny energie větru na mechanickou práci je orientace osy rotoru do směru větru. Při nedodržení této podmínky lze předpokládat poměrnou ztrátu výkonu  $\Delta P$  v závislosti na odchylce od směru větru  $\delta$ . Pro malé odchylky ji lze vypočítat ze vztahu

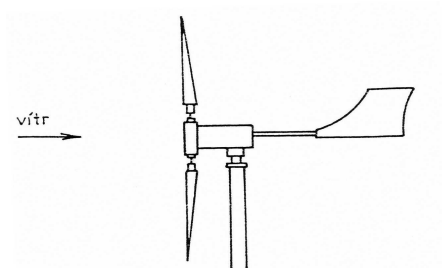
$$\Delta P = 1 - \cos^3 \delta \quad \text{Rov. 9}$$

Pro odchylku 4,5° vychází ztráta asi 1 %, s větší odchylkou však rychle narůstá (6,5° - 2 %, 8° - 3 %).

Natáčení osy rotoru do směru větru se děje automaticky, je-li rovina vrtule za osou otáčení rotorové gondoly po směru větru – tedy na závětrné straně Obr. 6. U rotoru umístěného před stožárem, proti směru větru do osy natáčení rotorové gondoly – na návětrné straně, musí být gondola opatřena orientačním zařízením, u menších větrných motorů kormidlem Obr. 7. Větší větrné motory mívají pomocná zařízení pro správnou orientaci rotoru pracující na různém principu.



**Obr. 6** Uspořádání rotoru za gondolou (po větru)



**Obr. 7** Uspořádání rotoru před gondolou se samočinnou orientací rotoru (proti větru) s orientací pomocí křídla

Velikost momentu síly vyvolávaného kormidlem bude tedy záviset na velikosti jeho plochy a na vzdálenosti aerodynamického působíště vztaku na této ploše od osy natáčení gondoly. Pro stanovení plochy kormidla  $A_K$  použijeme vztah

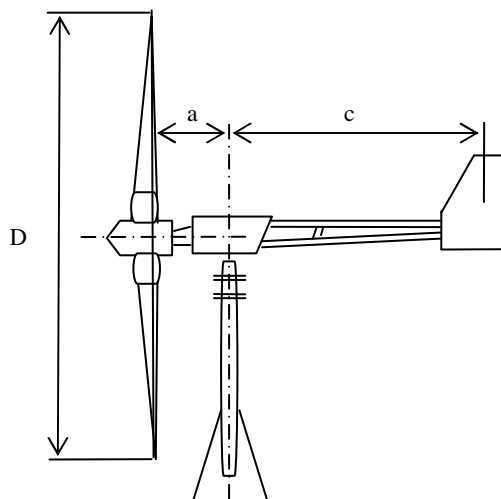
$$A_K = D^2 \frac{a}{c} k_k \quad \text{Rov. 10}$$

kde  $D$  - je průměr vrtule

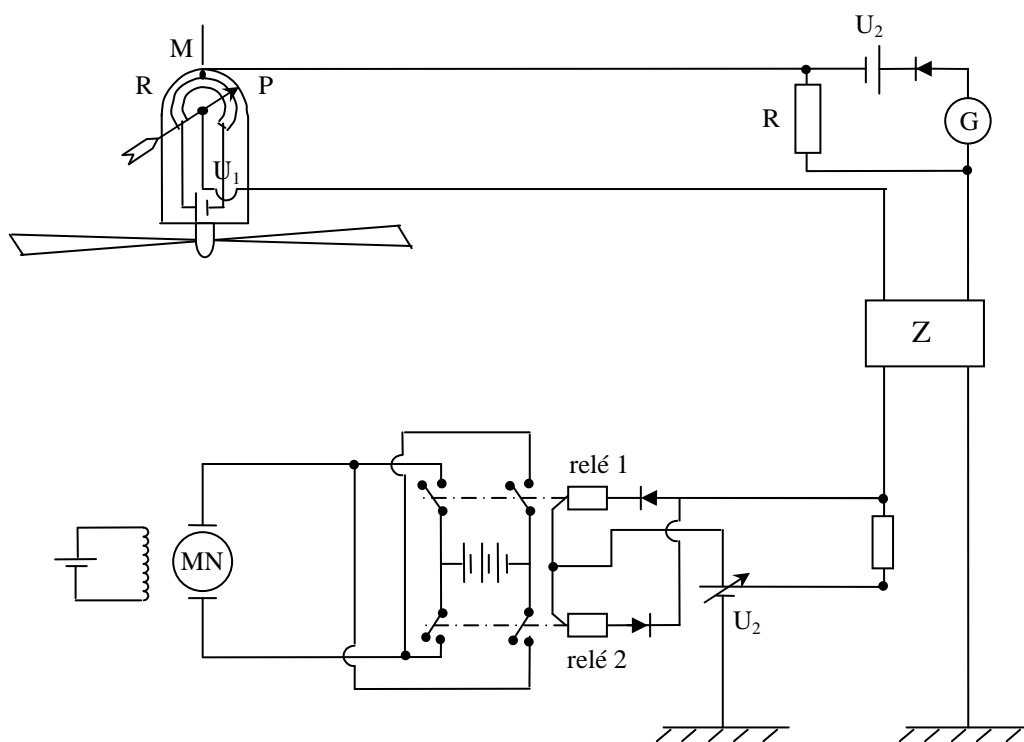
$a$  – vzdálenost od osy natáčení k rovině vrtule

$c$  – vzdálenost od osy natáčení k těžišti kormidla, která bývá volena obvykle  $c = (2 \text{ až } 5)a$

$k_k$  – empirický součinitel (u rychloběžných motorů  $k_k = 0,3$ , u pomaloběžných  $k_k = 0,32$ )

**Obr. 8** Otáčení vrtule kormidlem

Tam, kde se větrný motor používá k výrobě elektrické energie, je možné použít elektrický pohon orientačního zařízení. Informaci o směru větru lze získat pomocí větrné směrovky nebo pomocí jiných čidel umístěných na gondole. Způsobů, jakými lze uspořádat funkci natáčecího zařízení v závislosti na informaci od snímačů směru větru, může být mnoho. Jako například je uveden princip, který kromě orientace rotoru do správného směru při rychlostech větru menších než jaké odpovídají maximálnímu výkonu, zajistí změnu z optimální polohy rotoru, jestliže je rychlost větru větší a výkon generátoru musí být omezován. Schéma takového zapojení je na Obr. 9.

**Obr. 9** Elektronické natáčení gondoly

Motor MN, který ovládá natáčecí zařízení, se otáčí oběma směry. Je ovládán větrnou směrovkou a tachodynamem poháněným větrným motorem. Větrná směrovka je umístěna na gondole tak, aby nebyla ovlivňována deformací proudu vzduchu při průchodu rotorem (např. rotor je umístěn po větru za větrnou směrovkou) a je spojena s raménkem kruhového potenciometru pevně spojeného s gondolou. Potenciometrem se zavádí na vstup zesilovače Z napětí od zdroje  $U_1$  úměrné velikosti výchylky raménka mezi polohou M a P. Výstupní napětí ze zesilovače Z ovládá servoelektrický systém MN, který natáčí gondolu tak, aby napětí mezi body M a P kleslo na nulu a gondola se natočila do směru větru. Do vstupu zesilovače se však přivádí ještě napětí z obvodu G,  $U_2$  a R. Tachodynamo G dává střídavé napětí úměrné otáčkám větrného motoru, a to se usměrňuje tak, aby působilo proti napětí akumulátoru  $U_2$ . Dokud je toto usměrňené napětí menší než napětí  $U_2$ , neprotéká rezistorem R žádný proud a na vstupu zesilovače se objevuje jen napětí závislé na poloze gondoly vůči směru větru. Jakmile však napětí tachodynamu G překročí napětí zdroje  $U_2$ , vznikne na vstupu zesilovače regulační napětí, které přestavuje gondolu ze směru větru tak, aby otáčky větrného motoru nevzrůstaly. Odkloněním roviny rotoru z roviny kolmé ke směru větru je tak redukován výkon i otáčky větrného motoru. Aby natáčecí zařízení stále nepracovalo, není větrná směrovka spojena s raménkem reostatu pevně, ale s určitou vůlí, takže se natáčecí zařízení uvádí do činnosti teprve tehdy, když odchylka osy rotoru od směru větru je větší než přibližně  $10^\circ$ .

### 2.8.3 Regulace větrných motorů

Vzhledem ke značně proměnlivým rychlostem větru musí být, až na nepatrné výjimky, větrné motory chráněny proti překročení maximálních bezpečných otáček, v mnoha případech pak jsou omezeny otáčky i výkon pracovního stroje. Podle provedení rotorů existují v podstatě dvě základní skupiny regulačních principů:

- pro rotory s pevnými lopatkami nebo listy
- pro vrtule s natáčivými listy

## 2.9 Větrné motory se svislou osou

Větrné motory se svislou osou patří k nejstarším používaným větrným motorům. Nevyžadují složitý přenos výkonu od osy rotoru na zem, pokud se neusiluje o využívání energie větru ve větší výšce nad zemským povrchem. Pracují na odporovém nebo vztakovém principu.

Pro výrobu elektrické energie se z větrných motorů se svislou osou uplatňují prakticky pouze větrné motory navržené na vztakovém principu, který patentoval v roce 1931 francouz Darrieus. Základní součástí těchto větrných motorů jsou profilované lopatky různého tvaru, které rotují kolem svislé osy.

Větrné motory se svislou osou se vyrábějí a instalují, i když ne v takové míře jako větrné motory s vodorovnou osou. Jejich nevýhody prozatím převažují nad výhodami.

#### **Výhody:**

- nezávislost na směru větru
- mechanická síla na zemi
- jednoduchá konstrukce věže
- nižší náklady na výrobu lopatek

**Nevýhody:**

- nižší otáčky rotoru
- vyšší hmotnost (asi o 50 %)
- s kotevními lany zaujímá větší plochu
- neschopnost samospouštění
- nižší aerodynamická účinnost
- obtížná aerodynamická regulace
- práce v oblastech nižších rychlostí větru u země
- značná nerovnoměrnost momentu síly během otáčky

**2.10 Větrné elektrárny**

Větrné elektrárny se vyrábějí ve velkém rozsahu výkonů a používají se pro nejrůznější účely. Jejich rotory se navrhují většinou jako rychloběžné dvoulísté nebo třílísté vrtule spojené obvykle přes převodovku s generátorem střídavého proudu.

Jednotky menších výkonů se používají pro výrobu stejnosměrného proudu nejčastěji o napětí 12 V nebo 24 V. Vrtule pohání generátor přes převodové ústrojí, jen ve výjimečných případech u nejmenších výkonů přímo. Střídavý elektrický proud se usměrňuje v polovodičových usměrňovačích a takto vyrobená elektrická energie se používá hlavně pro nabíjení elektrochemických akumulátorů a pro rozhlasové přijímače a vysílačky, různá signalizační zařízení, např. bóje na moři, pro svícení a drobné spotřebiče na chatách a na různých malých pracovištích vzdálených od elektrické sítě nebo též pro elektrochemickou ochranu kovových konstrukcí. Při výrobě malých větrných elektráren se často využívají prvky automobilních elektrických instalací.

Větrné elektrárny větších výkonů se vyrábějí výhradně s rychloběžnými vrtulemi a se synchronními nebo asynchronními generátory. Takové větrné elektrárny pracují buď nezávisle, nebo ve spolupráci s jiným zdrojem elektrické energie, případně připojené na elektrickou síť.

Výhodou rychloběžných vrtulí pro větrné elektrárny je jejich lehkost a není třeba používat tak velké převodové poměry. Menší moment síly při vyšších otáčkách na hnacím hřídeli převodovky ovlivňuje také její hmotnost a rozměry. Horší rozběhové vlastnosti rychloběžných větrných motorů nejsou velkou závadou, protože generátory nekladou při malých otáčkách velký odpor. Při špatných rozběhových vlastnostech větrné elektrárny je možno použít generátory v motorovém chodu, je-li k dispozici jiný zdroj elektrického proudu.

U větrných elektráren středních a velkých výkonů (od desítek do tisíců kW) se používají synchronní nebo asynchronní generátory. Výhodou synchronního generátoru – alternátoru, je skutečnost, že si zajišťuje svůj magnetizační proud, je však dražší. Jeho nevýhodou je složité zařízení pro přifázování na síť, které musí zároveň zajišťovat odpojení generátoru, jestliže poklesnou otáčky větrného motoru a generátor by začal pracovat jako motor pohánějící vrtuli. Je to tím obtížnější, že režim práce větrného motoru se může měnit velmi často. Tyto problémy jsou sice poměrně dobře řešitelné, například připojením větrného motoru ke generátoru přes volnoběžnou spojku, celé zařízení se však komplikuje a prodražuje. Další nevýhodou u synchronního generátoru

je skutečnost, že při případném nutném odpojení menšího úseku sítě od hlavního zdroje by muselo být rovněž zajištěno automatické odpojení větrného generátoru, který by jinak do odpojené části sítě dodával proud a mohl by ohrozit život pracovníků na elektrotechnickém zařízení. Pokud by však větrná elektrárna měla pracovat v autonomním provozu, je použití alternátoru účelné.

Větrná elektrárna s asynchronním generátorem je nejčastěji používané uspořádání dnes vyráběných jednotek. Výhodné jsou zejména nízká cena generátoru, jeho jednoduchost a spolehlivost vzhledem k tomu, že nemá pohyblivé kontakty a umožňuje snadné připojení k síti bez nebezpečí vzniku oscilací v okamžiku přifázování. Otáčky asynchronního generátoru nemusí souhlasit s frekvencí sítě, pokud má generátor nadsynchronní otáčky, dodává elektrický proud do sítě, klesnou-li jeho otáčky do podsynchronních, dochází ke změně proudového toku a může být elektricky odpojen. Rotor se otáčí pomalu bez velkého odporu, dokud se opět nezvýší rychlost větru. Generátor se může použít k rozběhu rotoru.

Zařízení pro připojení k síti je rovněž velmi jednoduché, neboť vyžaduje pouze kontrolu otáček generátoru. Jestliže dosáhnou synchronních nebo nadsynchronních otáček, může se generátor k síti připojit.

Menší nevýhodou asynchronního generátoru je jeho poněkud nižší účinnost, zejména při větším rozdílu jeho otáček synchronních a jeho nepříznivý efekt na účinník sítě, ten však může být eliminován připojením vhodných kondenzátorů.

Pro střední a větší větrné elektrárny lze použít ještě komutátorový generátor, který vyrábí proud s konstantní frekvencí při proměnlivých otáčkách generátoru. Zatím však takové uspořádání, patrně pro jeho nákladnost, nebylo použito. Pokud se perspektivně uplatní, bude jeho maximální výkon omezen asi na 400 až 500 kW.

Při návrhu větrné elektrárny je nutno věnovat pozornost volbě správného výkonu generátoru. Při jeho řešení je třeba vycházet především z místních větrných podmínek. Je zcela zbytečné navrhovat a dimenzovat generátor s elektrickou přípojkou na výkon, který je dosahován při rychlostech větru, jež se vyskytují jen několik málo dní v roce. Elektrická soustava představuje na větrné elektrárně asi 11 až 12 % ceny bez nákladů na elektrickou přípojku, které mohou podle vzdálenosti tvořit 30 % hodnoty větrného motoru.

Má-li sloužit větrná elektrárna jako samostatný energetický zdroj, popřípadě ve spolupráci s nějakou akumulací soustavou, může být hlavním požadavkem zajistit ne sice maximální množství využití energie, ale co nejdelší dobu a největší pravidelnost její dodávky. To umožňuje minimalizovat kapacitu akumulacích zařízení a náklady na něj nebo spotřebu kapalných paliv pro spalovací motory použité jako náhradní zdroj. [1]

### **Výhody využití větrných elektráren**

- větrná energie je obnovitelným a nevyčerpatelným zdrojem energie
- při vlastní spotřebě elektrické energie se vyhneme přenosovým ztrátám
- při výrobě nejsou produkovány žádné škodlivé emise ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , NO, popel)
- přebytky vyrobené elektrické energie může výrobce prodávat do veřejné rozvodné sítě na základě smluvního vztahu s distribuční společností (majitelem rozvodné sítě) a tím může výrazně ovlivnit návratnost vložených finančních prostředků.



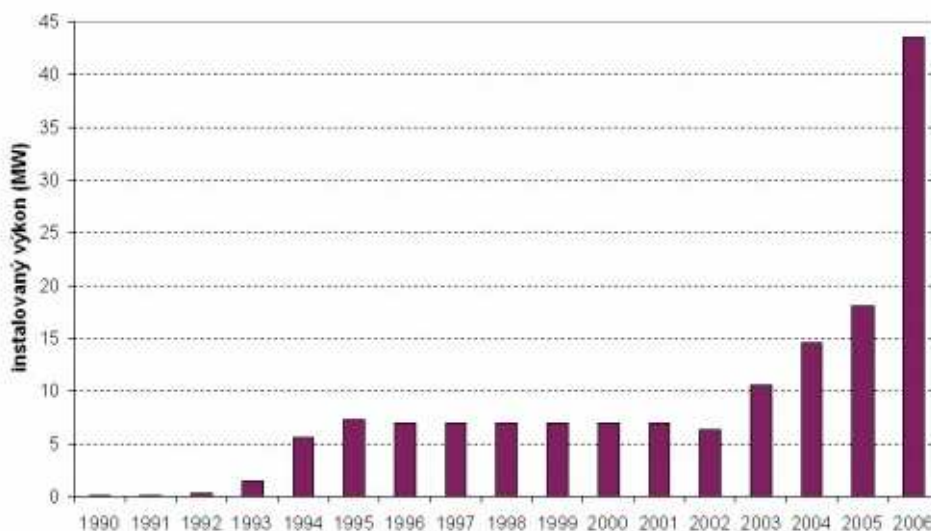
**Nevýhody využití větrných elektráren**

- poměrně vysoká hluchost
- nestabilní zdroj
- poměrně časově a finančně náročná předrealizační fáze
- návratnost vložených finančních prostředků je závislá na využití vyrobené elektrické energie

**2.11 Trend větrných elektráren**

V poslední době u nás větrných elektráren přibývá. Důvodů je více: zejména poměrně příznivé výkupní ceny a hlavně zákonem daná garance, že tyto ceny budou pevné po dobu 20 let od spuštění. Dalším důvodem může být možnost získání dotace, i když většina velkých větrných elektráren se u nás staví i bez dotace. Obcím navíc provozovatelé obvykle nabízejí roční příspěvky ve výši několika desítek tisíc Kč za jednu elektrárnu.

EU celkem 48 062 MW			
Německo	20 662 MW	Belgie	193 MW
Španělsko	11 615 MW	Polsko	153 MW
Dánsko	3 136 MW	Finsko	86 MW
Itálie	2 123 MW	Maďarsko	61 MW
Velká Británie	1 963 MW	Litva	55 MW
Portugalsko	1 716 MW	<b>Česká republika</b>	<b>44 MW</b>
Francie	1 567 MW	Lucembursko	35 MW
Nizozemsko	1 560 MW	Estonsko	32 MW
Rakousko	965 MW	Bulharsko	32 MW
Řecko	746 MW	Lotyšsko	27 MW
Irsko	745 MW	Slovensko	5 MW
Švédsko	572 MW	Rumunsko	3 MW

**Tab. 1** Instalovaný výkon větrných elektráren koncem roku 2006**Obr. 10** Instalovaný výkon větrných elektráren v ČR [2]

## 3 Monitorování a vyhodnocování parametrů kvality elektrické energie

### 3.1 Kvalita elektřiny

Ve smluvních vztazích mezi dodavateli a odběrateli elektrické energie je důležitá nejen kvantita, ale i kvalita dodávané elektrické energie, která je definována v normě ČSN EN 50160 (Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě). Kvalita je charakteristika elektrické energie v daném bodě elektrické sítě vyhodnocená vzhledem k souboru referenčních technických parametrů. Nedodržení kvality elektrické energie může způsobit ztráty v technologických procesech. Velikost ztrát je závislá na charakteru výroby; jiný dopad má krátkodobý pokles napětí na žíhací pec a jiný na pohon papírenského stroje. [4]

#### 3.1.1 Charakteristiky elektřiny dodávané z DS

Jednotlivé charakteristiky napětí elektrické energie, popisující kvalitu elektřiny dodávané z veřejné distribuční sítě, vycházejí z normy ČSN EN 50160 pro sítě NN a VN v platném znění.

Jsou to:

- a) kmitočet sítě
- b) velikost napájecího napětí
- c) odchylky napájecího napětí
- d) rychlé změny napětí
  - velikost rychlých změn napětí
  - míra vjemu flikru
- e) krátkodobé poklesy napájecího napětí
- f) krátkodobá přerušení napájecího napětí
- g) dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- h) dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- i) přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí
- j) nesymetrie napájecího napětí
- k) harmonická napětí
- l) mezipharmonická napětí
- m) úroveň napětí signálů v napájecím napětí

#### 3.1.2 Charakteristiky elektřiny dodávané regionálními výrobci

Výrobce dodávající elektřinu do DS ovlivňuje parametry kvality jednak dodávaným proudem a jeho kolísáním, proudovými rázy při připojování zdroje k síti, dodávkou nebo odsáváním harmonických proudů a proudů signálu HDO ze sítě, dodávkou nebo odsáváním zpětné složky proudu. Projevuje se současně jako zátěž i jako zdroj.

Pro elektřinu dodávanou regionálními výrobci platí ve společném napájecím bodě stejné parametry kvality, jako jsou pro dodávky elektřiny z DS. [5]

### 1. Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet napájecí sítě musí být 50 Hz. Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřená v intervalu 10 s v následujících mezích

- u systémů se synchronním připojením k propojenému systému

50Hz $\pm$ 1 %	(tj. 49,5 Hz...50,5 Hz)	během 99,5 % roku,
50Hz + 4 %/ -6 %	(tj. 47 Hz...52 Hz)	během 100 % času

- u systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy)

50Hz $\pm$ 2 %	(tj. 49 Hz...51 Hz)	během 95 % týdne,
50Hz $\pm$ 15 %	(tj. 42,5Hz...57.5 Hz)	během 100 % času

### 2. Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dána dohodnutým napájecím napětím  $U_C$ .

### 3. Odchyłky napájecího napětí

Za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušení napájení, musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_C \pm 10 \%$

### 4. Velikost rychlých změn napětí

Rychlé změny napájecího napětí jsou zejména způsobeny změnami zatížení v instalacích odběratelů nebo spínáním v síti.

Za normálních provozních podmínek rychlé změny napětí všeobecně nepřekračují 4 %  $U_C$ , za určitých podmínek se však mohou několikrát denně vyskytnout změny až do 6 %  $U_C$ .

### 5. Míra vjemu flikru

Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne krátkodobá míra vjemu flikru  $P_{st}$  a dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt}$  v 99 % sledovaných intervalů v mezích

$$P_{lt} \leq 0,6$$

$$P_{st} \leq 0,8$$

### 6. Krátkodobé poklesy napájecího napětí

Krátkodobé poklesy jsou všeobecně způsobeny zkraty v zařízení odběratelů nebo ve veřejné distribuční síti. Jejich četnost výskytu za rok se značně mění podle typu rozvodné sítě a bodu sledování. Mimoto může být jejich rozložení během roku velmi nepravidelné.

Směrné hodnoty:

Za normálních provozních podmínek může být očekávaný počet krátkodobých poklesů napětí během roku od několika desítek až do jednoho tisíce. Většina krátkodobých poklesů napětí má

dobu trvání kratší než 1 sekunda a hloubku poklesu menší než 60 %. Mohou se však občas vyskytnout krátkodobé poklesy napětí s větší hloubkou a dobou trvání. V některých oblastech se mohou velmi často vyskytovat krátkodobé poklesy napětí s hloubkou poklesu mezi 10 % až 15 %  $U_C$  jako následek spínání zatížení v instalacích odběratelů.

### 7. Krátkodobá přerušení napájecího napětí

Směrné hodnoty:

Za normálních provozních podmínek je roční výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí v rozsahu od několika desítek až do několika stovek. Přibližně 70 % krátkodobých přerušení bývá kratší než 1 s.

### 8. Dlouhodobá přerušení napájecího napětí

**Poruchová přerušení** napětí jsou obvykle způsobena vnějšími událostmi nebo vlivy, kterým dodavatel nemůže předcházet. Pro roční četnost a doby trvání dlouhodobých přerušení není možné udat typické hodnoty. To je způsobeno velkými rozdíly v uspořádání a struktuře elektrických sítí a rovněž nepředvídatelnými dopady povětrnosti a třetích stran.

Směrné hodnoty:

Za normálních provozních podmínek může být roční četnost přerušení napětí delších než 3 minuty menší než 10, avšak v závislosti na oblasti může dosahovat až 50.

Pro **plánovaná dohodnutá přerušení** se směrné hodnoty neuvádějí, protože tato přerušení se ohlašují v předstihu.

### 9. Harmonická napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotě uvedené v Tab. 2. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší.

Mimoto celkový činitel zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) musí být menší nebo rovný 8 %.

liché harmonické ne násobky 3		liché harmonické násobky 3		sudé harmonické	
řád harmonické h	Harmonické napětí %	řád harmonické h	Harmonické napětí %	řád harmonické h	Harmonické napětí %
5	6	3	5 <sup>*)</sup>	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
<sup>*)</sup> V závislosti na druhu sítě mohou být hodnoty třetí harmonické podstatně nižší POZNÁMKA Hodnoty pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních účinků obtížně předvídatelné.					

**Tab. 2** Hodnoty jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě  
v procentech  $U_n$  pro řády harmonických až do 25 [7]

### 3.2 Způsoby hodnocení parametrů kvality

Při měření a vyhodnocování charakteristik napětí se vychází z postupů definovaných v normě ČSN EN 61000-4-30 a ČSN EN 50160. V těchto normách jsou současně definovány i požadavky na vlastnosti měřicích souprav, které zaručují porovnatelnost a opakovatelnost měření.

Při měření charakteristik napětí je zapotřebí měřit a vyhodnocovat ta napětí, na která jsou připojovány odběry, tzn.:

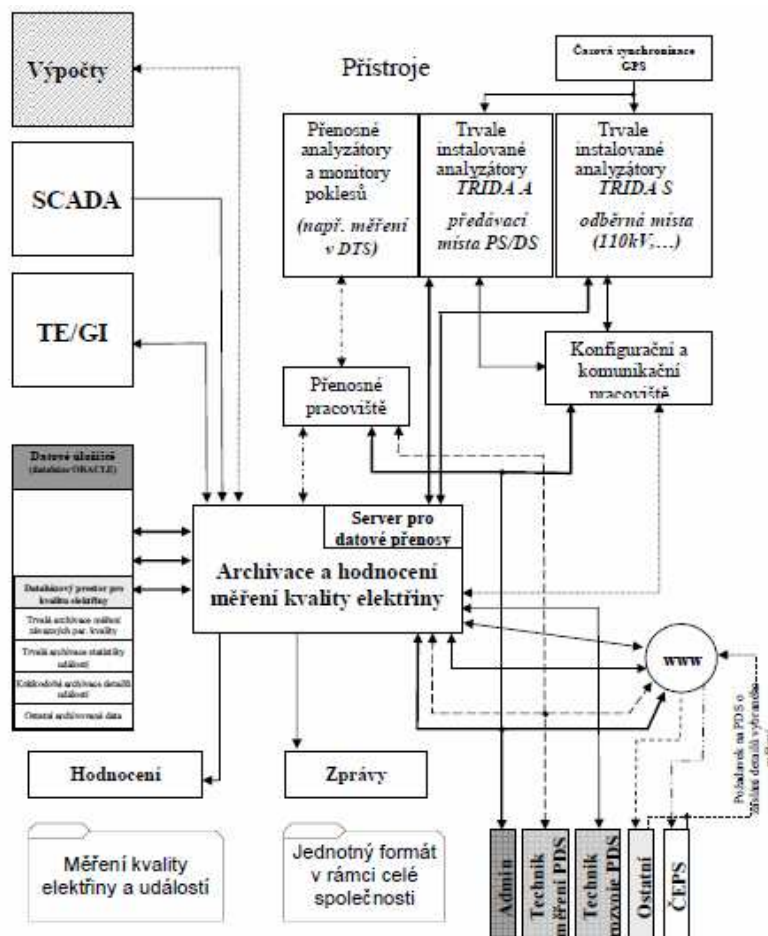
- ve čtyřvodičových sítích nn napětí mezi fázemi a středním vodičem, příp. i napětí mezi fázemi
- v sítích vn sdružená napětí
- v sítích vvn sdružená napětí.

Výsledky hodnocení parametrů kvality je PDS povinen archivovat spolu s potřebnými údaji o stavu sítě a jejích parametrech v čase měření pro prokazování kvality uživatelům DS, příp. ERÚ, i pro využití při plánování rozvoje sítí DS.

#### 3.2.1 Systémy měření, archivace a hodnocení parametrů kvality elektřiny v DS

Tento systém se skládá z následujících hlavních funkčních bloků, uvedených na Obr. 11:

Analyzátory kvality elektřiny  
 Komunikační a konfigurační pracoviště  
 Archivace a hodnocení měření kvality elektřiny



Obr. 11 Systém archivace a hodnocení měření kvality elektřiny

### 3.2.2 Konfigurační a komunikační pracoviště

Komunikační a konfigurační pracoviště slouží ke komunikaci a dálkové konfiguraci trvale instalovaných analyzátorů kvality elektřiny (PQA) v síti PDS. Obsahuje komunikační a konfigurační SW všech dodavatelů trvale instalovaných PQA jak třídy A, tak třídy B a to jak pro přenosy dat v předem naprogramovaných časových intervalech, tak i pro přenos vybraných dat na žádost administrátora systému měření a archivace parametrů kvality.

Současně umožňuje krátkodobou archivaci po dobu min. 40 dnů. Komunikační a konfigurační pracoviště dále předává naměřená data v plném rozsahu archivačnímu systému k dalšímu zpracování a trvalé archivaci výsledků měření kvality elektřiny.

### 3.2.3 Archivace a hodnocení měření

Subsystém archivace a hodnocení měření PQ přebírá od komunikačního a konfiguračního pracoviště naměřená data z trvale instalovaných analyzátorů kvality elektrické energie – třídy A i B k jejich vyhodnocení a archivaci. Přebírá všechna naměřená data a provádí jejich selekci k dalšímu hodnocení a trvalé archivaci.

Subsystém archivace a hodnocení měření PQ rovněž generuje protokol z měření kvality elektrické energie.

Subsystém archivace a hodnocení měření PQ dále zpracovává a archivuje data z měření kvality z přenosných analyzátorů kvality elektrické energie. Pro tyto typy analyzátorů obsahuje subsystém archivace a hodnocení PQ potřebná konverzní rozhraní pro přebírání dat a jejich konverzi do jednotného formátu. Data z těchto měření zadávají technici měření prostřednictvím svých přenosných pracovišť.

Subsystém archivace a hodnocení měření PQ je rovněž napojen na vnitropodnikové systémy – TE/GIS, a SCADA (popř. výpočtové systémy), pro jednoznačnou identifikaci míst měření a stavu sítě v době měření a pro předávání výstupů k jejich využití při hodnocení provozu a plánování rozvoje sítí.

### **3.2.4 Vyhodnocení naměřených hodnot**

Základní hodnocení úrovně kvality napětí ve sledovaném období, pro předací místa PS/DS a ostatní měřicí místa v sítích 110 kV obsahuje příloha 29, pro místa měření v síti vn příloha 30 a pro místa měření v síti nn příloha 31.

Obdobné tabulky pro proudové a k nim vztažené hodnoty v systému nejsou vytvářeny. Tyto měřené hodnoty slouží pro podrobnější analýzy a nadstavbové funkce, pro které je není vhodné spojovat jako napěťové parametry, u kterých se vychází ze zásady, že v třífázovém systému se jako rozhodující uvádějí vždy nejhorší hodnoty ze tří fází, popř. se uvádí součtové trvání narušení kvality zasahující různé fáze.

Rychlé změny napětí 110 kV, porovnané s příslušnými mezemi jsou součástí vyhodnocení pro jednotlivé hodinové intervaly pouze na vyžádání.

### **3.2.5 Uživatelé**

V rámci PDS jsou uživateli systému s definovanými a odstupňovanými přístupovými právy:

- a) Administrátor systému měření, archivace a hodnocení PQ
- b) technici měření
- c) technici rozvoje
- d) další pracovníci PDS (vedoucí pracovníci, apod.)

Pro plnění ustanovení Energetického zákona bude dále umožněn přístup pro ostatní uživatele DS s přístupem přes internet prostřednictvím www rozhraní, kde budou poskytovány souhrnné výsledky hodnocení kvality elektřiny (pouze napěťové veličiny).

V případě sporu o kvalitu dodávané el. energie v určitém místě a potřeby podrobné analýzy budou PDS nezbytná naměřená data ze systému měření, archivace a hodnocení PQ operativně poskytnuta pracovníkům, kteří tento spor řeší.

### **3.3 Požadavky na přístroje pro měření parametrů kvality**

Analyzátory kvality napětí v předávacích místech mezi přenosovou soustavou ČEPS a distribučními společnostmi musí být přednostně třídy A a schopny měřit současně tyto parametry kvality v trojfázové síti:

- a) kmitočet sítě
- b) velikost napájecího napětí a jeho odchylky
- c) rychlé změny napětí
- d) flickr
- e) poklesy a zvýšení napájecího napětí
- f) přerušení napájecího napětí
- g) nesymetrie napětí
- h) harmonické napětí
- i) mezipharmonické napětí
- j) signály v napájecím napětí

Kromě těchto parametrů kvality musí analyzátor umožňovat měření velikosti proudů a z nich odvozených (podle přiřazených napětí) i dalších veličin:

- k) činný výkon
- l) zdánlivý výkon
- m) jalový výkon
- n) zpětnou složku proudu a její úhlový vztah k referenčnímu napětí (nebo výkon)
- o) harmonické proudy a jejich úhlový vztah k referenčnímu napětí (nebo výkon)

Pro analyzátory kvality napětí v předacích místech z DS a společných napájecích bodech s regionálními výrobci se přednostně použijí analyzátory třídy S, v případě sporů se pro kontrolní měření kvality použijí analyzátory třídy A.

### **3.4 Specifikace metod měření a zkoušek přesnosti**

#### **3.4.1 Měřicí intervaly**

Definované měřicí intervaly jsou:

- velmi krátký čas: 3 s
- krátký čas: 10 minut
- dlouhý čas: 2 hodiny

Pro různé metody měření jsou požadovány tyto časové intervaly:

- pro síťovou frekvenci: 10 s
- pro flickr: 10 minut a 2 hodiny
- pro velikost napájecího napětí, harmonická / mezipharmonická napětí a nesymetrii:  
3 s, 10 minut a 2 hodiny
- pro signály po síti: 3 s a 10 minut



### 3.4.2 Zkoušky přesnosti

Základní stavy, ve kterých se ověřuje přesnost uvádí pro přístroje třídy A následující Tab. 3..

Ovlivňující veličina	Zkušební stav 1	Zkušební stav 2	Zkušební stav 3	Tolerance
Frekvence	50 Hz	49 nebo 59 Hz	51 nebo 61 Hz	$\pm 0,5$ Hz
Velikost napětí	Un	určený flikrem, nesymetrií, harmonickými, mezipharmonickými	určený flikrem, nesymetrií, harmonickými, mezipharmonickými	$\pm 1$ % Un
Flikr	žádný	Pst = 1, pravoúhlá modulace 2,275 Hz	Pst = 4 pravoúhlá modulace 8,8 Hz	0,1
Nesymetrie	žádná	0,73 Un fáze A 0,80 Un fáze B 0,87 Un fáze C všechny úhly 120° (nesymetrie 5 %)	1,52 Un fáze A 1,4 Un fáze B 1,28 Un fáze C všechny úhly 120° (nesymetrie 5 %)	0,5 %
Harmonické	žádné	10% Un 3.h. při 0° 5% Un 5.h. při 0° 5% Un 29.h. při 0°	10% Un 7.h. při 180° 5% Un 13.h. při 0° 5% Un 25.h. při 0°	3 % Un
Mezipharmonické	žádné	1% Un při 7,5 nás. zákl. harm.	1% Un při 1,8 nás. zákl. harm.	1 % Un

**Tab. 3** Stavy při zkouškách přesnosti (vztahované k měřeným charakteristikám napětí)

Pokud přístroj třídy A odebírá energii z měřicího vstupu, nesmí měnit charakteristiky napětí na měřicích vstupech.

Přesnost přístrojů musí být ověřována pro každou měřenou veličinu následujícím způsobem:

1. volba ověřované měřené veličiny (např. ef. hodnota napětí)
2. při udržování ostatních veličin ve zkušebním stavu 1 se ověřuje měřená veličina v pěti bodech rovnoměrně rozmístěných v pracovním rozsahu (např. 60 % Un, 95 % Un, 130 % Un, 165 % Un, 200 % Un)
3. při udržování ostatních veličin ve zkušebním stavu 2 se zkouška opakuje
4. při udržování ostatních veličin ve zkušebním stavu 3 se zkouška opakuje

## 3.5 Technické parametry

### 3.5.1 Pracovní rozsahy a prostředí

Ovlivňující veličina	Rozsah pro třídu A
frekvence	42,5 až 57,5 Hz
velikost napětí (ustálený stav)	60 – 200 % Un
flikr (Pst)	0 - 4
nesymetrie	0 – 5 %

harmonické (THD)	dvojnásobek kompatibilních úrovní podle IEC 61000-2-4
meziharmonické	dvojnásobek kompatibilních úrovní podle ČSN IEC 61000-2-4
signál HDO	0 – 9 %
přechodná přepětí	6 kV
rychlé přechodové jevy	4 kV

**Tab. 4** Pracovní rozsahy pro třídu A

Ovlivňující veličina	Rozsah
okolní teplota	-20 °C ÷ + 45 °C
vlhkost	20 % ÷ 90 %
magnetická indukce vnějšího původu při vztažné frekvenci (50 Hz) libovolného směru	až do 0, 5 mT; IEC 1036, tabulka 14
vnější elektrické pole při vztažné frekvenci (50 Hz) libovolného směru	až do 1 kV/m
elektrostatické výboje	15 kV, IEC 61000-4-2
elektromagnetické vf pole (80 – 1000 MHz)	10 V/m, IEC 61000-4-3
pomocné napájecí napětí	

**Tab. 5** Pracovní prostředí

### 3.6 Měření parametrů kvality a smluvní vztahy

Podmínky smlouvy musí být zároveň dosažitelné pro jednu a přijatelné pro druhou stranu. Výchozím bodem musí být standard nebo specifikace odsouhlasená oběma zúčastněnými stranami. Pozornost je zapotřebí věnovat plánovacím hladinám a úrovním kompatibility v příslušných normách.

Pro to, aby naměřené hodnoty reprezentovaly podmínky běžného provozu, lze při vyhodnocování měření kvality elektřiny nepřihlížet (nikoliv je vyloučit) k datům, která byla naměřena za výjimečných podmínek, jako:

- extrémní povětrnostní podmínky
- cizí zásahy
- nařízení správních orgánů
- průmyslová činnost (stávky v mezích zákona)
- vyšší moc
- výpadky napájení způsobené vnějšími vlivy

V kontraktu by mělo být určeno, zda data označená příznakem mají být vyloučena z vyhodnocení při posuzování, zda výsledky měření vyhovují podmínkám kontraktu. Pokud jsou data s příznakem vyloučena z vyhodnocení, výsledky měření jsou obecně vzájemně pro jednotlivé parametry nezávislé a každý parametr bude možno snadněji porovnat s hodnotami v kontraktu. Pokud budou data s příznakem zahrnuta do vyhodnocení, výsledky budou více přímo svázány

s účinky sledovaných parametrů kvality na citlivou zátěž, ale bude mnohem obtížnější, nebo přímo nemožné srovnání s podmínkami kontraktu.

Pokud je rozhodnuto o nezbytnosti měření PQ pro posouzení, zda dodávka elektřiny vyhovuje podmínkám kontraktu, je na smluvní straně, která požaduje měření, aby je zajistila. To však neznamená, že by kontrakt nemohl obsahovat ujednání, kdo bude zajišťovat měření. Je též možno konzultovat třetí stranu. [5]

### **3.7 Analyzátory BK-ELCOM**

Veškeré modely analyzátorů kvality BK-Elcom vyráběné od roku 2005 splňují požadavky normy ČSN EN 61000-4-30 na třídu vykonávání měření A.

Na rozdíl od mnoha jiných přístrojů tohoto určení splňují analyzátory BK-Elcom kromě požadavků mezinárodních norem i požadavky na vyhodnocování podle závazných národních dokumentů platných pouze v ČR, jako jsou např. pravidla provozování distribučních soustav (PPDS), příloha 5, a podniková norma PNE 33 3430-7. Tyto dokumenty rozšiřují některé požadavky mezinárodních standardů na analyzátory kvality elektřiny. Při přednákupním ověřování, zda zvolený přístroj vyhodnocuje všechny potřebné parametry přístrojové techniky pro monitorování kvality, bývají často dokumenty PPDS a PNE opomíjeny. Dále bývá opomíjeno vyžadování trvalého vyhodnocování všech meziharmonických a rychlých napěťových změn. Mnoho výrobců tyto parametry nevyhodnocuje, přestože jsou mezinárodními normami i PPDS a PNE vyžadovány. Důvod je jednoduchý – přístroje jsou jednodušší a levnější. Nákup těchto ochuzených přístrojů však nelze doporučit.

Současně s monitorováním kvality dovoluje moderní koncepce přístrojů současně vyhodnocovat mnoho dalších parametrů i simultánní běh jak zapisovače tranzientních dějů se vzorkovací frekvencí až 38 kS/s na každý analogový a digitální kanál, tak zapisovače poruch, který zaznamenává veličiny každou půlperiodu. Mnoho funkcí a vlastností bylo doplněno na základě přání uživatelů přístrojů.

Všechny analyzátory kvality elektřiny BK-Elcom používají již více než dvanáct let techniku měřicích přístrojů postavenou na bázi osobního počítače, který je ukryt v útrobě přístroje. Toto řešení využívá stále více významných výrobců měřicí techniky. V analyzátoch BK-Elcom jsou použity měřicí karty National Instruments s kvalitní softwarovou podporou pro vývojové prostředí LabView a jazyk C. To umožňuje snadno změnit vlastnosti přístroje při vyvinutí jiné softwarové aplikace. Potřeba měnit vlastnosti přístroje může být vynucena např. přijetím změn v ČSN nebo specifickými potřebami uživatele.

Nezanedbatelnou výhodou analyzátorů kvality elektřiny BK-Elcom je firmware se stejným uživatelským rozhraním a stejným formátem datových souborů pro všechny modely. Tím je zaručena plná kompatibilita dat mezi různými modely přístrojů, což dovoluje použít jednotný software pro zpracování dat a popř. jednotný replikátor pro ukládání dat do databáze.

### 3.7.1 Analyzátoři kvality elektřiny pro trvalou instalaci

Pevně instalované analyzátoři (někdy také nazývané jako stacionární analyzátoři) jsou určeny pro trvalé monitorování kvality elektřiny např. v rozvodnách mezi předávací a distribuční soustavou. Na rozdíl od přenosných analyzátorů nedisponují velkým počtem rozsahů na napěťových a proudových vstupech a proud obvykle není měřen proudovými kleštěmi. Konstrukce je podřízena montáži do rozváděče. Tyto analyzátoři jsou většinou vybaveny napěťovými vstupy 57,7/100 V a přímými proudovými vstupy 1/5 A.

Stacionární analyzátoři kvality elektřiny BK-Elcom, široce používají nejvýznamnější distributoři elektrické energie v rámci celé ČR a prostřednictvím zahraničního partnera i v desítkách instalací v Rakousku. Řada stacionárních analyzátorů kvality elektřiny BK-Elcom má označení ENA400. Její velkou konkurenční výhodou je monitorování volitelného počtu třífázových soustav jediným přístrojem, což kromě mnoha výhod technického charakteru výrazně snižuje také cenu na jeden monitorovaný systém. Maximální počet napěťových a proudových vstupů jediného přístroje je třicet dva. Jsou-li třeba pouze napěťové vstupy, umožňuje ENA400 monitorovat deset třífázových přípojníc jediným přístrojem. Jsou-li měřeny kromě napětí i proudy, je možné jediným přístrojem ENA400 monitorovat pět třífázových přípojníc.

Volitelně se záznamem přechodových jevů na vstupech U+I lze synchronně zaznamenávat až šedesát čtyři digitálních vstupů se vzorkovací frekvencí až 38 kS/s na každý analogový nebo digitální kanál. Záznam je možné spustit od řady vyhodnocovaných elektrických veličin nebo od editovatelného logického výrazu pro digitální vstupy. Specifikem modelu ENA400 je volitelné vyhodnocování synchronních fázorů a synchronizace měřených vzorků dat vzdálených přístrojů prostřednictvím GPS s přesností na stovky mikrosekund.

Dalšími modely pevně instalovaných analyzátorů jsou ENA440 a ENA450. Model ENA440 je menší variantou modelu ENA400 s maximálním počtem vstupů pro napěťové a proudové signály sníženým na šestnáct. Všechny ostatní parametry jsou shodné s ENA400. Model ENA450 je novinka velmi malých rozměrů  $180 \times 88 \times 90$  mm ( $\text{š} \times \text{v} \times \text{h}$ ) s širokým rozsahem pracovních teplot  $-40$  až  $+70$  °C a příkonem do 10 VA. Vzhledem k nízkému příkonu lze přístroj napájet i z měřených signálů 57,7/100 V a zabezpečit i fungování do pěti minut po ztrátě napájení.



Obr. 12 ENA400



Obr. 13 ENA450

### 3.7.2 Přenosné analyzátoři kvality elektřiny

Přenosné analyzátoři kvality elektřiny jsou určeny pro časté používání na různých místech distribuční soustavy na všech napěťových hladinách. Přenosné analyzátoři mají velký počet rozsahů na napěťových a proudových vstupech. Proudů se měří proudovými kleštěmi v klasickém provedení s magnetickým obvodem nebo prostřednictvím Rogowského cívky. Někteří výrobci

analyzátorů kvality umožňují připojit Rogowského cívky s externím zesilovačem – lze snížit náklady na samotný přístroj vzhledem k vysokým cenám příslušenství. Přenosné analyzátory kvality BK-Elcom standardně nabízejí interní zesilovače pro Rogowského cívky a při nákupu příslušenství lze tyto cívky použít bez zesilovače za příznivější cenu.

Podobně jako u analyzátorů pro pevnou instalaci poskytují varianty analyzátoru ENA500 možnost monitorovat volitelný počet třífázových soustav jediným přístrojem, což kromě mnoha výhod technického charakteru výrazně snižuje cenu na jeden monitorovaný systém. Maximální počet napětových a proudových vstupů jediného přístroje je šestnáct. Vyráběné varianty jsou 4U+4I, 4U+12I, 8U+8I. Modely ENA500 umožňují připojit externí box se šestnácti nebo dvaatřiceti digitálními vstupy. Stav digitálních vstupů současně se signály U+I může být zaznamenáván v modulu tranzientního zapisovače se vzorkovací frekvencí až 38 kS/s na každý analogový nebo digitální kanál. Záznam lze spustit od řady vyhodnocovaných elektrických veličin nebo od editovatelného logického výrazu pro digitální vstupy.

Společnost Elcom, a. s., představila v roce 2007 novou generaci přenosných přístrojů pro monitorování kvality elektřiny. Jde o kompaktní přenosné analyzátory BK-Elcom s označením ENA300 a ENA330. Ve srovnání s modely ENA500 byly výrazně zmenšeny jejich rozměry na  $66 \times 308 \times 257$  (v × š × h) a rovněž hmotnost – na 1,5 kg. Toho všeho bylo dosaženo při zachování plné funkčnosti a přesnosti přístrojů. Navíc model ENA330 obsahuje funkci zálohování napětí pro několik desítek sekund provozu po ztrátě napájecího napětí. ENA300 je odlehčenou školní variantou analyzátoru, která neobsahuje vestavěný procesor, a tak je nutné mít analyzátor trvale připojen k notebooku nebo stolnímu počítači, na kterém běží firmware. [4]



**Obr. 14** ENA300



**Obr. 15** ENA500

## 4 Popis sítě v místě připojení větrné elektrárny

Větrný park Oderské vrchy – Veselí, Dobešov naplňuje státem stanovenou koncepci rozvoje energetiky v ČR, reaguje na Státní program úspor energie a využití obnovitelných zdrojů a je v souladu s cíli Státní politiky životního prostředí. Elektrická energie vyrobená z alternativních, obnovitelných zdrojů, v tomto případě využívající síly větru, je nejčistší formou výroby energie.

Z hlediska životního prostředí je třeba na větrné elektrárny obecně pohlížet jako na zařízení významně šetřící přírodu a její zdroje. Technologie výroby elektrické energie využívající síly větru neprodukuje obvyklé chemické škodliviny ani skleníkové plyny. Je jednou z nejčistších forem výroby energie a naplňuje tak potřebu trvale udržitelného rozvoje společnosti.

Podmínky pro rentabilní provoz větrných elektráren v hodnocené lokalitě jsou dány vysokým větrným potenciálem, což vyplývá z Obr. 16.

Pro vlastní umístění větrných elektráren musí být také splněny další podmínky:

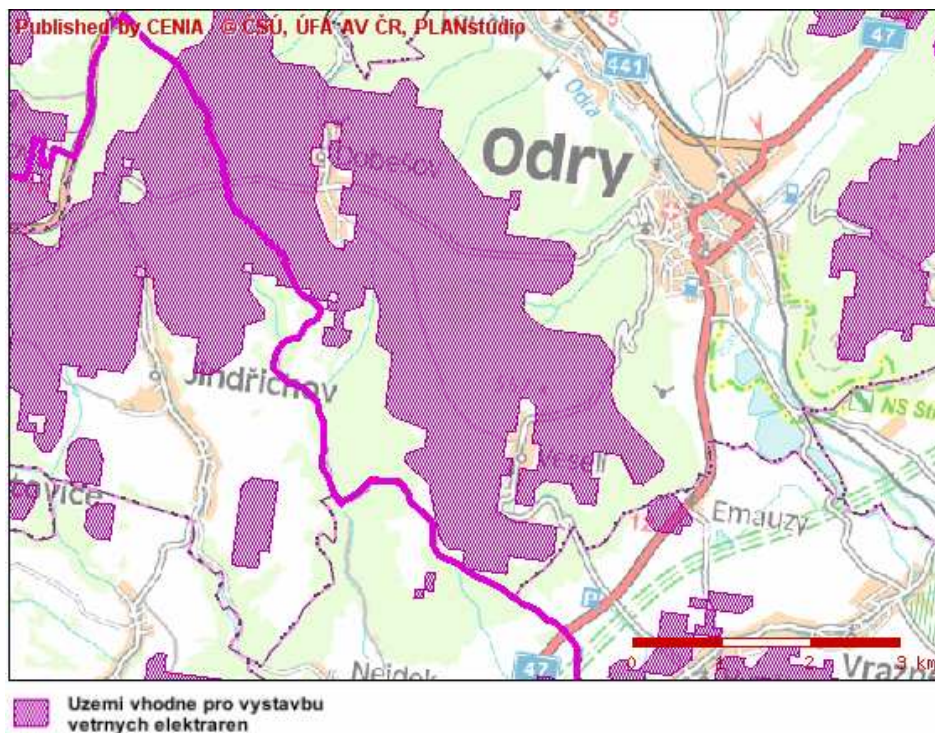
- možnost napojení na distribuční soustavu
- možnost příjezdu přepravních, stavebních a zvedacích mechanismů
- dostatečná vzdálenost od obydlí (eliminace akustických emisí)
- místo s dostatečným volným prostorem pro zajištění laminárního proudění větru
- výstavbou a provozem neohrozit existenci citlivých ekosystémů

### 4.1 Území s dostatečným větrným potenciálem

V územní energetické koncepci Moravskoslezského kraje je zahrnuto i využívání energie větru výhradně však v lokalitách s příznivými větrnými podmínkami (průměrná roční rychlost větru vyšší než 5 m/s) při zachování ostatních podmínek vhodnosti (eliminace negativního vlivu na krajinu, obyvatelstvo, faunu, flóru, dostupnost distribučního systému pro vyvedení el. výkonu, apod.).

Na území Moravskoslezského kraje jsou vhodné podmínky pro instalaci větrných elektráren pouze na několika lokalitách (rychlost větru nad 5 m/s – měřeno v 10 m nad terénem), jedná se o část okresů Frýdek – Místek, Opava a Bruntál.

Zpracovávaná data byla ze 2 větrných elektráren se jmenovitým výkonem 2 MW, které jsou umístěny mezi obcemi Dobešov – Veselí západně od obce Odry. Větrné elektrárny jsou umístěny v ose SZ – JV v okolí obcí Veselí a Dobešov severozápadním směrem od Veselského kopce.



Obr. 16 Území vhodné pro výstavbu větrných elektráren [3]

#### 4.2 Autonomní systémy

Systémy nezávislé na rozvodné síti (grid-off), tedy autonomní systémy, slouží objektům, které nemají možnost se připojit k rozvodné síti. Zde se obvykle používají mikroelektrárny s výkonem od 0,1 do 5 kW. Součástí autonomního systému jsou i akumulátory a řídicí elektronika. V objektu pak může být buď rozvod stejnosměrného proudu s nízkým napětím (12 nebo 24 V), nebo je v systému zapojen ještě střídač pro dodávku střídavého proudu 230 V. Podle toho je nutno objekt vybavit energeticky úspornými spotřebiči. Autonomní systémy bývají často doplněny fotovoltaickými panely pro letní období, kdy je méně větru, ale více sluníčka. Pro větší výkony se používají větrné elektrárny se synchronními generátory.

Můžeme se také setkat s myšlenkou využít větrnou energii k vytápění rodinného domu nebo chaty. Toto využití je trochu problematické. Dům pro bydlení by měl stát na místě chráněném před větrem. Větrná elektrárna naopak potřebuje větru co nejvíce. Nízko nad zemí je vzduch brzděn stromy, domy a dalšími překážkami, takže je nutno umístit turbínu na co nejvyšší stožár. Kabel mezi domem a elektrárnou zvyšuje náklady; pokud by měl vést přes cizí pozemky, může jít o nepřekonatelnou překážku.

Dalším problémem je dostatečná rychlost větru. Malé stroje začínají pracovat již při rychlostech okolo 4 m/s (14,4 km/h), ale jejich výkon je velmi malý. Energie větru totiž roste se třetí mocninou rychlosti, takže např. vítr o rychlosti 5 m/s má dvakrát více energie než při rychlosti 4 m/s. Problémem je ale i příliš vysoká rychlost větru - při rychlosti kolem 20 m/s je obvykle nutno elektrárnu zastavit (zabrzdit vrtuli), aby nedošlo k havárii. Plného (jmenovitého) výkonu dosahuje elektrárna při rychlostech větru kolem 10, někdy až 15 m/s - podle typu a výrobce. Takto silný vítr fouká jen zřídka, elektrárna tedy většinu provozní doby poběží na nižší výkon.



### 4.3 Systémy připojené k síti

Systémy dodávající energii do rozvodné sítě (grid-on) jsou nejrozšířenější a používají se v oblastech s velkým větrným potenciálem. Slouží téměř výhradně pro komerční výrobu elektřiny.

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	2230	1830
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	1830	1990
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2008 do 31. prosince 2008	2610	2210
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2007 do 31. prosince 2007	2680	2280
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2006	2730	2330
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2005 do 31. prosince 2005	2990	2590
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2004 do 31. prosince 2004	3140	2740
Větrná elektrárna uvedená do provozu před 1. lednem 2004	3480	3080

**Tab. 6** Výkupní ceny za elektřinu z větrných elektráren

Trendem je výstavba stále větších strojů (průměr rotoru 40 až 100 m a stožár o výšce více než 100 m). Důvodem jsou nižší měrné náklady na výrobu energie a maximální využití lokalit, kterých je omezený počet. Ve vnitrozemí se staví stroje s výkonem 100 až 2000 kW. Na moři (poblíž pobřeží) se využívají turbíny s výkonem až 5 MW. Naopak starší vnitrozemské elektrárny s výkony do 200 kW se demontují a nahrazují silnějšími, i když jsou ještě provozuschopné. Nabízí se pak k vývozu i do ČR. Pozor: garantované výkupní ceny platí pouze pro zařízení, která nejsou starší než 2 roky.

Velké větrné elektrárny mají asynchronní generátor, který dodává střídavý proud většinou o napětí 660 V, a tudíž nemohou pracovat jako autonomní zdroje energie. Existují i elektrárny



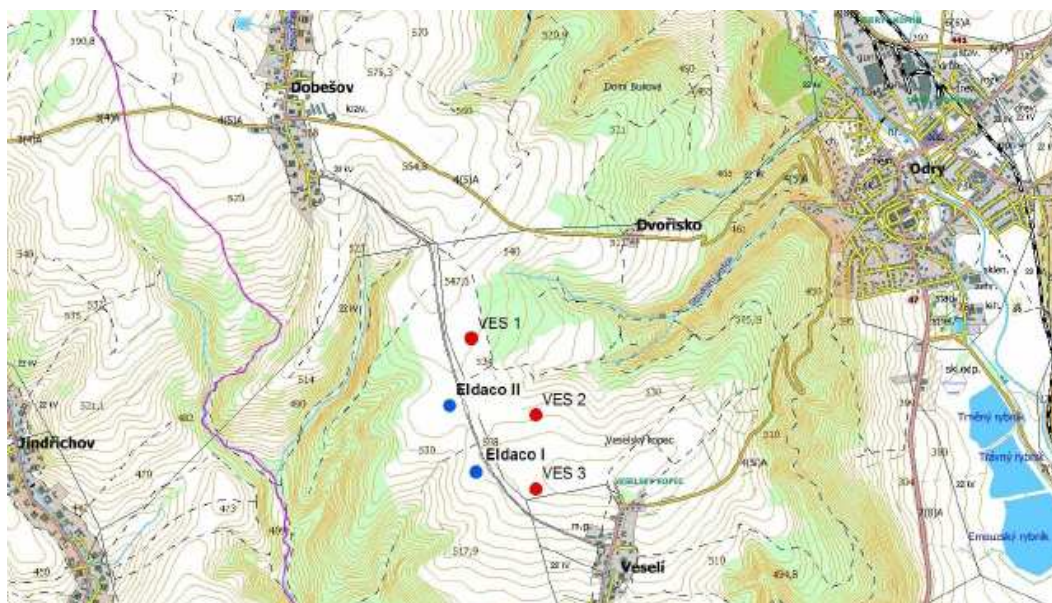
se speciálním mnohápólovým generátorem, který nevyžaduje převodovou skříň. Většina elektráren má konstantní otáčky - s rostoucí rychlostí větru se zvyšuje zátěž generátoru.

Moderní větrné elektrárny mají rozběhovou rychlost větru kolem 4 m/s. Pro zvýšení výroby jsou některé turbíny vybaveny dvěma generátory (nebo jedním generátorem s dvojím vinutím). Při nízké rychlosti větru běží menší generátor, při vyšší rychlosti větru se přepne na větší generátor. Startovací rychlost pro snížený výkon je potom kolem 2,5 m/s.

K zefektivnění provozu a snížení nákladů na projektování a výstavbu se velké elektrárny sdružují do skupin (obvykle 5 až 30 elektráren), tzv. větrných farem. Na Obr. 17 můžeme vidět objekty VE, přičemž 1. a 2. věž zprava jsou stávající objekty společnosti Eldaco a.s. Další tři věže jsou plánované elektrárny Ostwind. Snímek byl pořízen z místa při jižním okraji obce Dobešov, fotografováno ve směru na Veselí.



**Obr. 17** Větrný park Oderské vrchy – Veselí, Dobešov



**Obr. 18** Letecký pohled – stávající 2VE + plánované 3VE [2]

#### 4.4 Popis technického a technologického řešení elektrárny

Stavba každé věže větrné elektrárny vyžaduje dočasný zábor ploch zemědělské půdy pro základovou desku o rozměrech 15,6 x 15,6 m a plochu pro základy trafostanice. Na dalších pozemcích s obslužnými plochami bude zábor ZPF také dočasný, na dobu 20 let (životnost elektrárny).

Věž se zakládá na čtvercovém, vyztuženém základu s podezdívkou. Spojení mezi ocelovou trubkovou věží a základem je prováděno pomocí zabudovaného základového dílce se 140 šrouby M42 10.9. Násyp zeminy překrývá těleso základu až po výšku 2,20 m nad spodní hranu fundamentu. Nejvyšší přípustná hladina podzemní vody musí ležet pod spodní hranou fundamentu. Základem výpočtu provozní pevnosti je životnost 20 let.

Větrná elektrárna V90 – 2,0 MW	
Elektrický jmenovitý výkon generátoru	2000 kW
Výška hlavy	105,0 m
Osový sklon hřídele hlavy	6,0°
Úhel vzepětí rotoru (od věže odvrácený)	2,0°
Průměr rotoru	90,0 m
Jmenovitý počet otáček	14,9 min <sup>-1</sup>
Variabilní počet otáček rotoru/max. počet otáček	8,2 ... 17,3 min <sup>-1</sup>
Hmotnost rotoru (hlava a listy)	34000 kg
Těžiště hmotnosti rotoru (vzdálenost k ose věže)	4,50 kg
Hmotnost gondoly (bez hlavy listů)	68000 kg
Těžiště hmotnosti gondoly (vzdálenost k ose věže na návětrné straně)	-0,63 m
Rozběhová rychlost větru	4,0 m/s
Jmenovitá rychlost větru	23,0 m/s
Rozsah postavení úhlu nastavení listů (špička listu)	-3,4° ... +90,0°

**Tab. 7** Hlavní parametry větrné elektrárny V90 – 2,0 MW

#### 4.5 Princip a hlavní části větrné turbíny VESTAS V90-2,0MW

**VESTAS V90-2,0 MW** má poloměr rotoru 45 m. Listy rotoru jsou vyrobeny z epoxidové pryskyřice vyztužené skelným vláknem. Každý list rotoru se skládá ze dvou polovin, které obklopují nosnou traverzu. Rotor je vybaven systémem OptiSpeed. Tato vlastnost umožňuje provozování zařízení s optimálním počtem otáček (RPM) a tím dosahování optimalizovaného výkonu.

Pomocí systému **OptiSpeed** může rotor pracovat s variabilním počtem otáček. Jde o pomaloběžný stroj s otáčkami v rozmezí 8 – 17 ot./min. Zapínací rychlost větru je 4 m/s, průměrná pracovní rychlost je 13 m/s, vypínací (maximální) rychlost větru je 25 m/s. Po překročení této rychlosti dojde k automatickému zabrzdění a odstavení stroje.

Veškeré větrné elektrárny V90-2,0 MW jsou vybaveny zařízením **OptiTip**, firmou VESTAS vyvinutým systémem k optimalizování úhlu sklonu. Pomocí zařízení OptiTip jsou listy rotorů nastaveny vždy na příslušnému směru větru optimální úhel. Tím je optimalizována výroba energie a je minimalizován hluk.

**Hlavní hřídel** přenáší energii přes převod na generátor. U převodu se jedná o kombinaci planetového a čelního ozubeného převodu se šikmým ozubením. Přenos výkonu z převodu na generátor se uskutečňuje pomocí kompozitní spojky. Generátor zařízení je čtyřpólový asynchronní generátor s kroužkovým rotorem.

**Zvyšovací transformátor** středního napětí je na konci strojovny umístěn v separátním prostoru. Transformátor je konstrukce ze suché pryskyřice, která byla vyvinuta speciálně pro větrné elektrárny.

Při všech rychlostech větru optimalizují systémy OptiTip® a OptiSpeed® předávání výkonu, nezávisle na teplotě a hustotě vzduchu. Při vysokých rychlostech větru se starají o to, aby odevzdávaný výkon ležel v oblasti jmenovitého výkonu.

Větrná elektrárna je vybavena **brzdovým systémem**, který rotaci v případě potřeby zastaví. Tento systém se stará o plné zastavení listů rotoru a je aktivována hydraulická brzda. Parkovací brzda se nachází na vysokorychlostním hřídeli převodu.

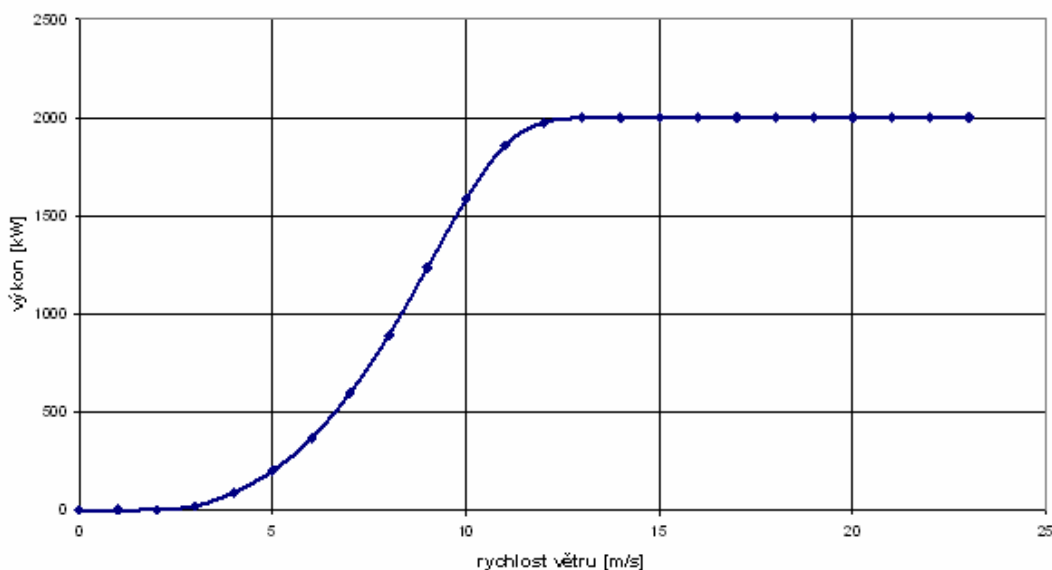
Všechny funkce větrné elektrárny jsou kontrolovány a regulovány mikroprocesorem regulovanou **řídící jednotkou**. Řídicí systém je vybaven celou řadou senzorů, aby byla zajištěna bezpečnost a optimální provoz zařízení.

**Pitch-systém** je provozován třemi hydraulickými válci – vždy jeden pro list rotoru. Ve strojovně umístěná hydraulická jednotka dodává hydraulický tlak pro pitch-systém a systém brzd. Systémy jsou vybaveny hydraulickými akumulátory, aby bylo zaručeno regulované a bezpečné vypnutí při výpadku sítě.

Čtyři elektrické **otočné převody** umožňují rotaci strojovny na špičce věže. Systém otočných převodů je proveden jako radiální ložisko s počátečním třením.

**Kryt strojovny** vyrobený z plastu vyztuženého skelným vláknem chrání veškeré komponenty uvnitř strojovny před deštěm, sněhem, prachem, slunečním zářením atd. Centrálně umístěný otvor umožňuje přístup z věže do strojovny. Ve strojovně je umístěn údržbový jeřáb s nosností cca 800 kg. Jeřáb může být vybaven nosností až po 9500 kg.

Po ukončení doby životnosti budou VE demontovány v časovém horizontu cca jednoho roku. Samotná demontáž jedné elektrárny je plánována na cca 1 týden (3 dny samotné zařízení, 4 dny základy). Po odstranění VE tedy na lokalitě nezůstane ani betonový základ – bude rozdrčen a použit např. na výstavbu silnic apod. Pozemek bude poté uveden do původního stavu. [3]



Obr. 19 Výkonová křivka V90-2,0 MW

#### 4.6 Připojení k síti

Vlastní výrobní, popř. zařízení odběratelů s vlastními výrobny, které mají být provozovány paralelně se sítí PDS, je zapotřebí připojit k síti ve vhodném předávacím místě.

Způsob a místo připojení na síť stanoví PDS s přihlédnutím k daným síťovým poměrům, výkonu a způsobu provozu vlastní výrobní, stejně jako k oprávněným zájmům výrobce. Tím má být zajištěno, že vlastní výrobní bude provozována bez rušivých účinků, neohrozí napájení dalších odběratelů.

Posouzení možností připojení z hlediska zpětných vlivů na síť vychází z impedance sítě ve společném napájecím bodě (zkratového výkonu), připojovaného výkonu, stejně jako druhu a způsobu provozu vlastní výrobní.

K zabránění zavlečení zpětného napětí do sítě PDS je zapotřebí zajistit technickými opatřeními, aby připojení vlastní výrobní k síti PDS bylo možné pouze tehdy, když jsou všechny fáze sítě pod napětím.

K připojení může být použit jak spínač, který spojuje celé zařízení odběratele se sítí, tak i spínač, který spojuje generátor popř. více paralelních generátorů se zbylým zařízením odběratele. Zapnutí tohoto vazebního spínače musí být blokováno do té doby, dokud není na každé fázi napětí minimálně nad rozběhovou hodnotou podpěťové ochrany.

K ochraně vlastní výrobní se doporučuje časové zpoždění mezi obnovením napětí v síti a připojením výrobní v rozsahu minut.

##### 4.6.1 Změny napětí při spínání

Změny napětí ve společném napájecím bodě, způsobené připojováním a odpojováním jednotlivých generátorů nebo zařízení, nevyvolávají nepřijatelné zpětné vlivy, pokud největší změna napětí pro výrobní s předávacím místem v síti nn nepřekročí 3 % tj.

$$\Delta u_{\max nm} \leq 3\%.$$

Rov. 11

Pro výrobní s předávacím místem v síti vn platí:

$$\Delta u_{\max \text{ vn}} \leq 2\%. \quad \text{Rov. 12}$$

Toto platí, pokud spínání není častější než jednou za 1,5 minuty.

Při velmi malé četnosti spínání, např. jednou denně, může PDS připustit větší změny napětí, pokud to dovolí poměry v síti.

Pro výrobní v síti 110 kV platí pro omezení změny napětí vyvolané spínáním:

a) Normální provoz:

Spínání jedné výrobní jednotky (např. jednoho generátoru větrné turbíny)

$$\Delta u_{\max} \leq 0,5\% \quad \text{Rov. 13}$$

Spínání celého zařízení (např. větrného parku)

$$\Delta u_{\max} \leq 2\% \quad \text{Rov. 14}$$

b) Poruchový provoz

Pro změnu napětí při spínání celého zařízení platí

$$u \leq \Delta u_{\max} \leq 5\% \quad \text{Rov. 15}$$

V závislosti na zkratovém výkonu  $S_{kV}$  v síti PDS a jmenovitém zdánlivém výkonu  $S_{nE}$  jednotlivé výrobní lze odhadnout změnu napětí

$$\Delta u_{\max} = k_{i \max} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}}. \quad \text{Rov. 16}$$

Činitel  $k_{i \max}$  se označuje jako “největší spínací ráz” a udává poměr největšího proudu, který se vyskytuje v průběhu spínacího pochodu (např. zapínací ráz  $I_a$ ) ke jmenovitému proudu generátoru nebo zařízení:

$$k_{i \max} = \frac{I_a}{I_{nG}}. \quad \text{Rov. 17}$$

Asynchronní stroje připojované přibližně se synchronními otáčkami mohou vlivem svých vnitřních přechodných jevů způsobit velmi krátké poklesy napětí. Takovýto pokles smí dosáhnout dvojnásobku jinak přípustné hodnoty, tj. pro síť vn 4 %, pro síť nn 6 %, pokud netrvá déle než dvě periody a následující odchylka napětí od hodnoty před poklesem napětí nepřekročí jinak přípustnou hodnotu.

Pro větrné elektrárny platí speciální “činitel spínání závislý na síti”, který musí výrobce prokazovat, jímž se hodnotí jejich spínání a který také respektuje zmíněné velmi krátké přechodné jevy. Tento činitel respektuje nejen výši, ale i časový průběh proudu v průběhu přechodného děje a udává se jako funkce úhlu impedance sítě  $\psi$  pro každé zařízení ve zkušebním protokolu.

Jeho pomocí lze vypočítat fiktivní “náhradní změnu napětí”,

$$\Delta u_{ers} = k_{i\Psi} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}}, \quad \text{Rov. 18}$$

kteřá rovněž (jako  $\Delta_{\text{umax}}$ ) nesmí překročit hodnoty podle vztahů (Rov.12) až (Rov.15).

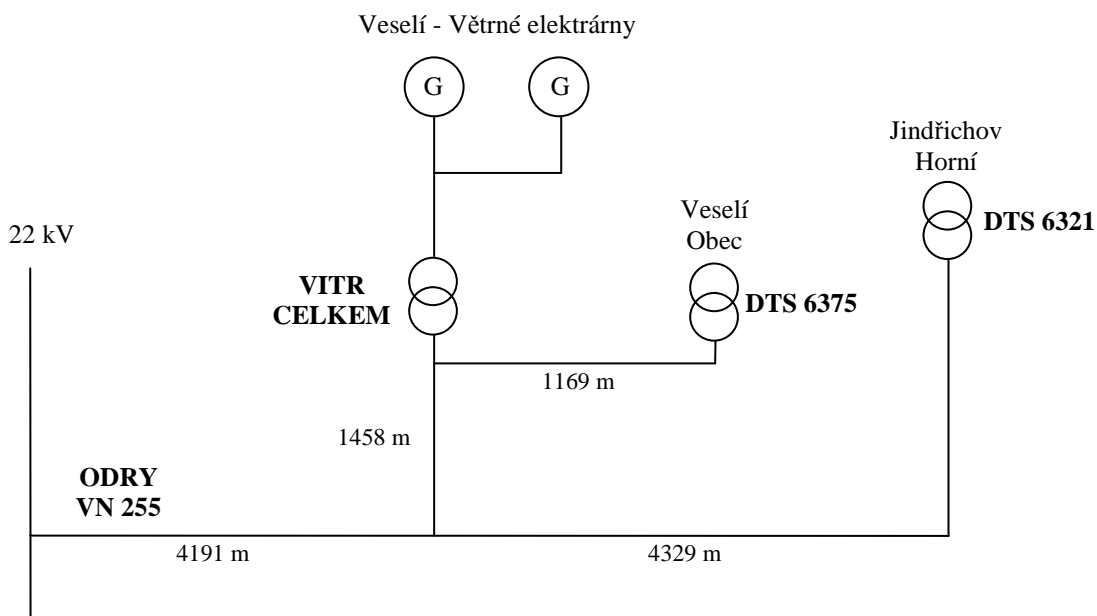
S ohledem na minimalizaci zpětného vlivu na síť PDS je zapotřebí zamezit současnému spínání více generátorů v jednom předávacím místě. Technické řešení je časově odstupňování jednotlivých spínání, které je závislé na vyvolaných změnách napětí. Při maximálním přípustném výkonu generátoru musí být minimálně 1,5 minuty. Při zdánlivém výkonu generátoru do poloviny přípustné hodnoty postačí odstup 12 s. [6]

## 5 Analýza měřených dat

### 5.1 Měřicí místa

Na Obr. 20 je znázorněno zjednodušené schéma kabelové sítě v okolí dvou větrných elektráren ve Veselí. Spolu s těmito elektrárnami jsou zakreslená čtyři místa, na kterých byla prováděna měření. Tato místa jsou vyznačena tučným písmem a jsou to:

- rozvodna ODRY VN255
- transformátor větrných elektráren
- distribuční trafostanice DTS6375 v obci Veselí
- distribuční trafostanice DTS321 na konci trasy v obci Jindřichov



**Obr. 20** Zjednodušené schéma kabelové sítě

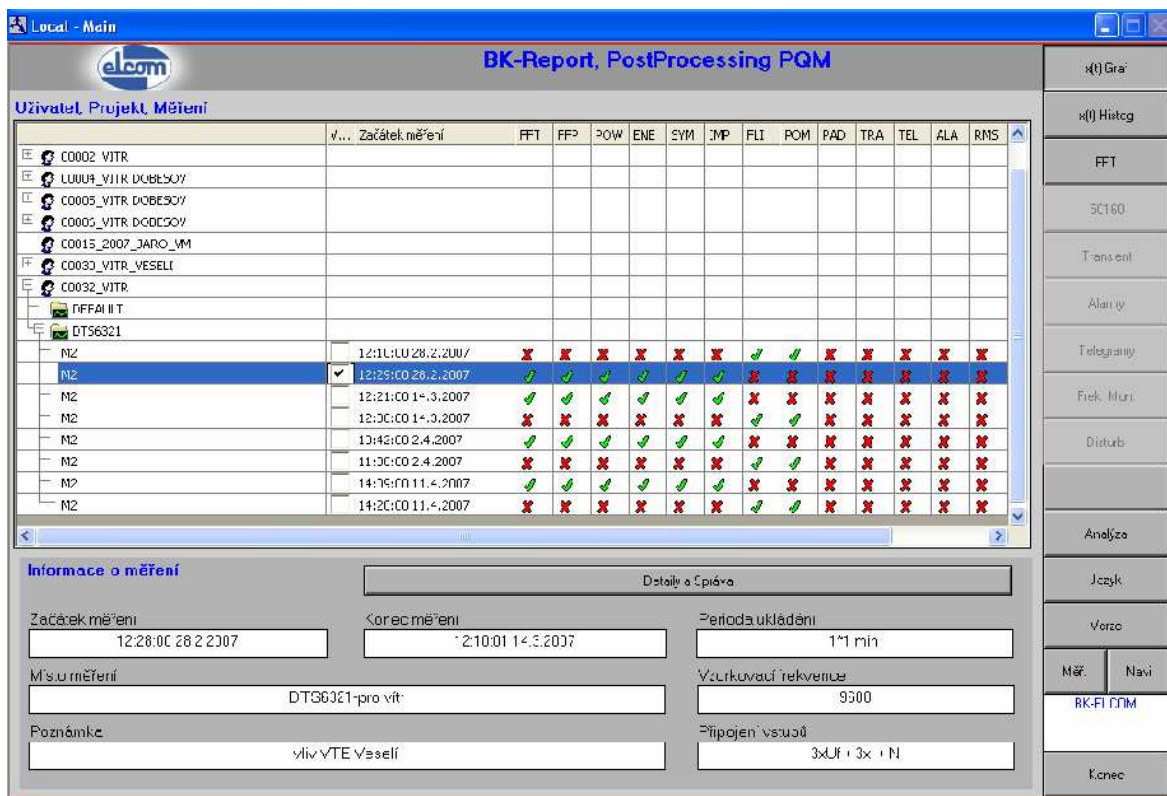
### 5.2 Výběr dat

Data, která jsem měl k dispozici byla z jarních měsíců roku 2007, kdy se větrné elektrárny ve Veselí začaly uvádět do provozu. Data byla z různých míst a časových intervalů. Proto bylo nejprve nutné, abych vybral období, ze kterého mám možnost porovnávat nejvíce veličin z měřicích míst mezi sebou. Nakonec jsem vybral dvě období v odlišných měsících i délkách jejich trvání. Paralelně jsem porovnával:

- 1. období 28.2. – 14.3. 2007
- 2. období 2.4. – 11.4. 2007

### 5.3 Zpracování dat

Pro načtení dat z analyzátoru BK-Elcom jsem použil program „ENA verze 2.8“, jehož úvodní okno je na Obr. 21. V horní části okna si můžeme vybrat soubor s naměřenými daty. Na první pohled vidíme, o jaké období se jedná a jaké veličiny byly měřeny.

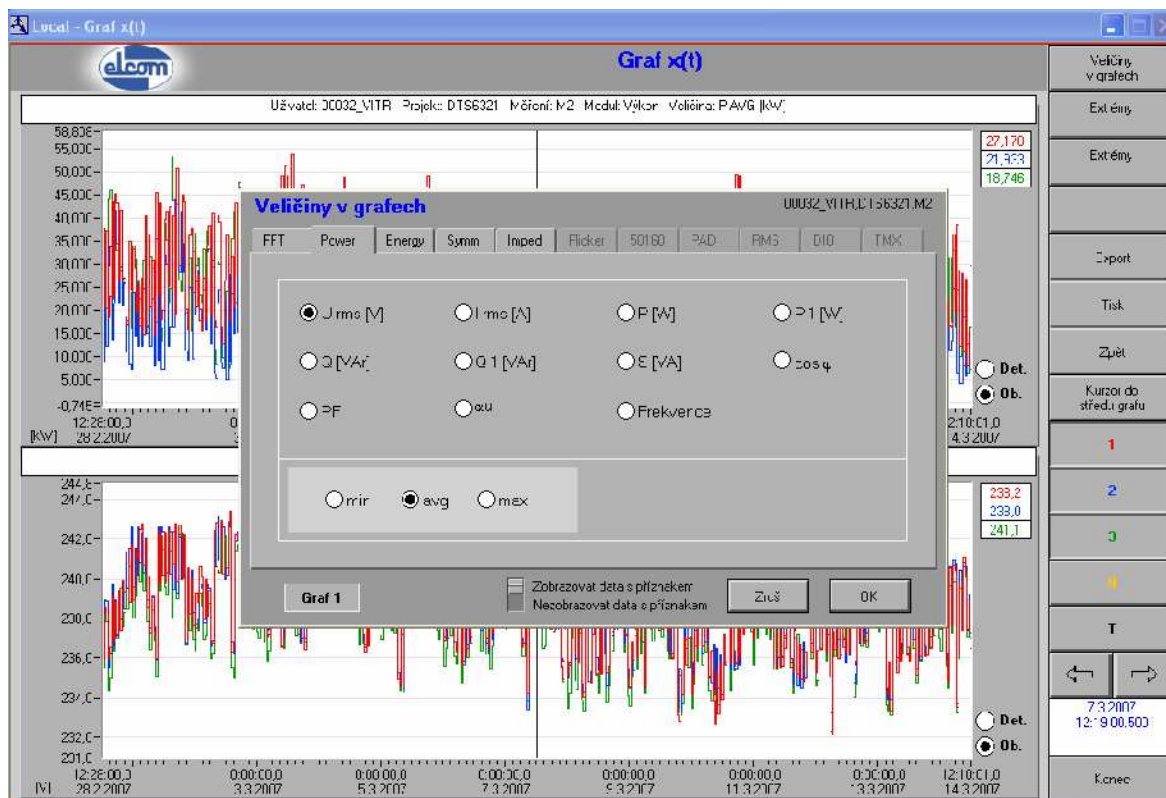


Obr. 21 ENA verze 2.8

Jakmile si zvolíme soubor, který chceme otevřít, použijeme v pravé části funkční tlačítko „Analýza“. Po jeho stisknutí se nám objeví datum a čas, kdy bylo měření zahájeno a kdy ukončeno. Toto období se může dále upravovat na požadovaný termín v tomto časovém intervalu. Jestliže jsme s výběrem období hotovi, pokračujeme tlačítkem „OK“.

Na následujícím Obr. 22 je další okno, kde se nám zobrazí dvě pole, ve kterých jsou vykreslovány grafy. V pravém horním rohu je tlačítko „Veličiny v grafech“, díky kterému si můžeme prohlédnout a porovnat průběhy námi vybraných veličin. Tyto průběhy je možno libovolně umístit jak do horního, tak i dolního pole. Pomocí levého tlačítka myši je možné přiblížit si požadovanou část grafu. V pravém spodním rohu jsou dvě šipky, kterými lze pohybovat kurzorem (svíslá černá čára v grafu) do stran a určovat tak přesnou amplitudu. Hodnota amplitudy je vyčíslena pro každou fázi zvlášť a odlišena barevným písmem. V pravém sloupci jsou barevná tlačítka, kterými je možné skrýt nebo naopak zobrazit požadovanou křivku.





Obr. 22 Analýza

Pro mě nejdůležitějším a hlavně nejpoužívanějším tlačítkem bylo tlačítko „Export“. Tímto způsobem jsem si označil veličiny, které mne zajímaly a vyexportoval jsem je do poznámkového bloku. Data z tohoto bloku jsem importoval do Excelu, kde jsem s nimi dále pracoval, upravoval a tvořil grafy, které jsem níže popsal a jejich průběhy uvedl v přílohách.

## 5.4 Napětí

Na úvod jsem v první a druhé příloze znázornil spojitost mezi samotnými napětími. Rozdíly ve středních efektivních hodnotách napětí byly zanedbatelné. V síti VN bylo napětí VTE vyšší než napětí na rozvodně v Odrách o pár desítek voltů a v síti NN bylo napětí naměřené na DTS6321 větší cca o 5 V než na DTS6375. Průběhy napětí jsou velice podobné pro obě časová období i obě napěťové hladiny.

## 5.5 Napětí a výkon

V přílohách 3 – 6 lze vidět spojitost mezi napětími a vyráběným výkonem z VTE. V první polovině prvního období tj. 28.3. – 8.2., je elektrárna v provozu a napětí se pohybuje na hodnotě asi o 2 V vyšší než tomu je v druhé polovině, kdy generátory většinu času stojí a nevyrábějí elektrickou energii. Během druhého období elektrárna vyrábí nepravidelně a výkyvy napětí jsou patrnější. Zvláště na počátku a konci měřeného intervalu lze vidět nárůst napětí.

## **5.6 Dlouhodobý vjem flikru**

Přílohy 7 a 8 ukazují vliv VTE na dlouhodobý vjem flikru. Zejména uprostřed 2. období, od 5.4. – 9.4., kdy větrná elektrárna nevyrábí, si můžeme povšimnout nárůstu Plt, který má své maximum právě mezi těmito dny, narozdíl od počátku a konce, kdy generátory vyrábějí elektrickou energii a dlouhodobý vjem flikru se pohybuje v oblasti nižších hodnot 0,3 – 0,4.

## **5.7 Krátkodobý vjem flikru**

Obdobná záležitost je krátkodobý vjem flikru, vyjádřený v přílohách 9 a 10, na jehož průběh má rovněž vliv větrná elektrárna. Jak lze vidět, tento vliv je pozitivní, neboť v době provozu dochází k poklesu krátkodobého vjemu flikru a naopak v období, kdy se vrtule netočí a elektrárna nevyrábí, hodnota krátkodobého vjemu flikru stoupá – podobně jako u dlouhodobého vjemu flikru v období mezi 5.4. a 9.4. je jasně patrný nárůst.

## **5.8 TDHu**

Celkový činitel harmonického zkreslení, nebo-li THDu je znázorněn v přílohách 11 a 12. Má charakteristický průběh, který nezáleží příliš na produkci větrné elektrárny, ale spíše na spínaných zdrojích, jakými jsou nejčastěji televizní přijímače. Na těchto grafech můžeme vidět, ve kterou dobu se v domácnostech usedá k televizorům. V dnešní době udávají výrobci hodnotu celkového činitele vyššími harmonickými nepřekračující 5 %. Měla by být dostačující, aby nedocházelo k nepříznivému ovlivňování dalších zařízení připojených do sítě. Velikost THDu nepřekročila během měření 2 %.

## **5.9 3. a 5. harmonická**

V přílohách 13 až 20 jsou znázorněny grafy pro napětí 3. harmonické v závislosti na výkonu VTE. Průběhy napětí jsou ve všech třech fázích vyrovnané bez větších skoků a pohybů směrem nahoru nebo dolů, tím pádem 3. harmonická není ovlivňována provozem větrné elektrárny.

V přílohách 21 až 28 jsou znázorněny grafy pro napětí 5. harmonické v závislosti na výkonu VTE. V tomto případě jsou průběhy všech tří fází téměř identické, ale opět nemůžeme tvrdit, že by na napětí měl vliv provoz elektrárny. Pro 1. období jsou ve všech měřících místech charakteristické dvě výchylky ve dnech 3. a 4. března. Obdobně tomu tak je na počátku 2. období.

V každém případě se hodnoty napětí 3. i 5. harmonické pohybují v mezních hodnotách uvedených v normě ČSN EN 50160.

## 6 Závěr

V dnešní době se ve velké míře využívá obnovitelných zdrojů energie k výrobě elektřiny a zejména to jsou větrné elektrárny a farmy větrných elektráren. Tyto se staly symbolem ekologické výroby elektřiny, někdy jim však byl vyčítán hluk, stroboskopický efekt, rušení zvěře nebo rušení televizního signálu. Současné elektrárny jsou však mnohem modernější než byly např. před deseti lety, a pokud jsou i vhodně umístěny, k těmto problémům již nedochází.

Co se týče problémů elektrického charakteru, tak větrné elektrárny jsou decentralizované zdroje elektrické energie. Rozumíme tím zdroje, které nejsou zahrnuty do plánovaného nasazování velkých elektráren. Jsou většinou zapojeny do distribuční sítě a výkonově se pohybují v rozmezí od 100 kW do 150 MW. V závislosti na instalované kapacitě decentralizovaných zdrojů a jejich možném rozšíření se mění i křivky ročního a denního diagramu zatížení. Větrné elektrárny jsou zdroje elektrické energie mající vliv na kvalitu dodávek elektrické energie. Největší problémy s vyvedením elektrického výkonu větrných elektráren vyplývají z faktu, že výkon je velmi závislý na síle a rychlosti větru a proto není možné zajistit konstantní dodávku elektrické energie do místa vyvedení.

Při začlenění větrné elektrárny do pokrývání diagramu zatížení je dodávka nestabilní a závisí na povětrnostních podmínkách a proto je třeba zajistit dostatečné množství elektrické energie pro pokrývání odchylek způsobených větrnými elektrárnami. Přípojně místo pro vyvedení výkonu musí být dostatečně dimenzováno, aby nedocházelo k přetěžování sítě. Kolísání napětí je ovlivňováno kompenzací jednotlivých strojů či celé farmy větrných elektráren, které jsou vybaveny regulací založenou na výkonové elektronice a jsou tedy i rušivými zdroji v elektrické síti.

Tyto vlivy nelze zcela eliminovat, ale lze je alespoň omezit na přijatelnou míru užitím vhodné technologie. Jak prokázala analýza měřených dat, vliv dvou větrných elektráren VESTAS V90 - 2 MW v Oderských vrších na napájecí soustavu není v žádném případě negativní. Veškeré důležité parametry kvality elektrické energie jako napětí, dlouhodobá a krátkodobá míra vjemu flikru, celkový činitel harmonického zkreslení, 3. a 5. složka harmonického napětí byly vyhodnoceny a můžeme říci, že tyto větrné elektrárny provozované od ledna 2007 mají spíše stabilizační schopnost zejména co se týče flikru a dodávají kvalitní elektrickou energii.

Obnovitelné zdroje elektrické energie zdaleka nevyrábějí tolik elektrické energie jako uhelné nebo jaderné elektrárny, ale z důvodu ekologické nezávadnosti se čím dál více prosazuje jejich výzkum, vývoj a využívání. A proto si myslím, že větrné elektrárny čeká technické zdokonalování a slibná budoucnost. Diplomová práce v rozsahu a kvalitě podle mého názoru splnila zadání a poskytuje ucelený přehled o současném stavu i možnostech dalšího využívání VE v podmínkách ČR.

## Literatura

- [1] Rychetník, V.: *Větrné motory*, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995, I. vydání, 66 s. ISBN 80 - 7078 - 281 - 1
- [2] *ekoWATT* [online]. 2008 [cit. 2009-11-25]. Energie větru. Dostupné z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>>.
- [3] *Informační systém EIA* [online]. 2006 [cit. 2010-03-15]. MSK348\_\_oznameni. Dostupné z WWW: <[http://tomcat.cenia.cz/eia/detail.jsp?view=eia\\_cr&id=MSK348](http://tomcat.cenia.cz/eia/detail.jsp?view=eia_cr&id=MSK348)>.
- [4] *Elektro.* [online]. 2009 [cit. 2010-03-02]. Monitorování kvality elektřiny. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36632](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36632)>.
- [5] *ČEZ Distribuce* [online]. 2009 [cit. 2010-03-25]. PPDS 2009 – Příloha č. 3. Dostupné z WWW: <<http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2009.html>>.
- [6] *ČEZ Distribuce* [online]. 2009 [cit. 2010 - 03 - 27]. PPDS 2009 - Příloha č. 4. Dostupné z WWW: <[http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2009/ppds\\_priloha\\_4\\_2009.pdf](http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2009/ppds_priloha_4_2009.pdf)>.
- [7] Česká technická norma: *ČSN EN 50160*, Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 2000, s. 13 - 15
- [8] *tzb-info* [online]. 6.8.2007 [cit. 2010-05-02]. Problematika připojování větrných elektráren do distribuční sítě. Dostupné z WWW: <<http://elektro.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4279>>.